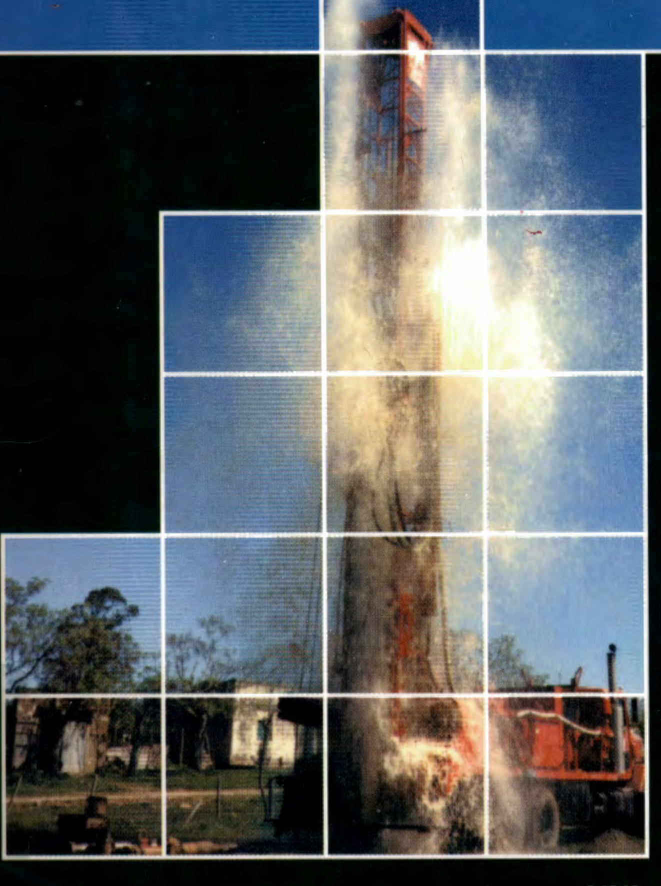
Acuíferos Regionales en América Latina

Sistema Acuífero Guaraní

Capítulo argentino-uruguayo

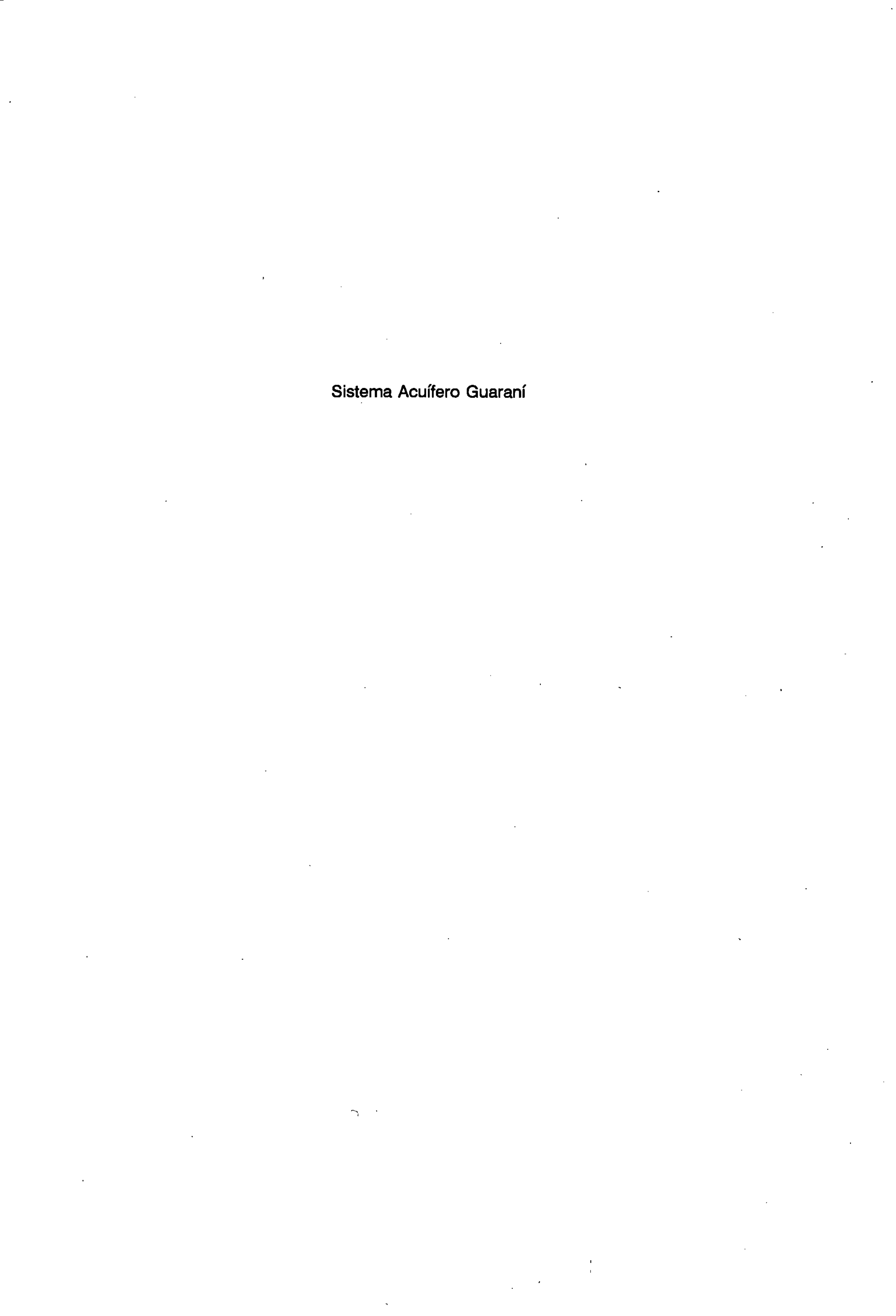


Jorge Montaño
Ofelia Tujchneider
Miguel Auge
Mario Fili
Marta Paris
Mónica D'Elía
Marcela Pérez
María Inés Nagy
Paula Collazo
Pablo Decoud

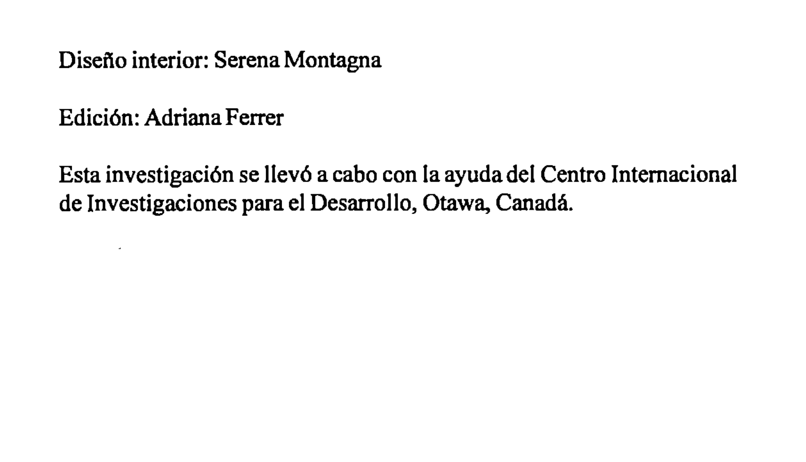
UNL

Este libro surge de un convenio firmado entre el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá (C.I.I.D.), las Universidades Nacionales del Litoral y de Buenos Aires, de Argentina, y la Universidad de la República de Uruguay, para la participación coordinada de sus grupos de investigación hidrogeológica en el Programa "Acuíferos Regionales de América Latina". La misión del programa es elaborar un informe sobre el estado actual del conocimiento del Sistema Acuífero Guaraní.

I.S.B.N. 987-508-033-0



Sistema Acuífero Guaraní



Diseño interior: Serena Montagna

Edición: Adriana Ferrer

Esta investigación se llevó a cabo con la ayuda del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo, Otawa, Canadá.

Centro de Publicaciones, Secretaría de Extensión,
Universidad Nacional del Litoral,
9 de Julio 3563, 3000 - Santa Fe
Tel.: (042) 571110 - Int.: 208
FAX: (042) 571194

Acuíferos Regionales en América Latina

Sistema Acuífero Guaraní

Capítulo argentino-uruguayo

Jorge Montaño
Ofelia Tujchneider
Miguel Auge
Mario Fili
Marta Paris
Mónica D´Elía
Marcela Pérez
María Inés Nagy
Paula Collazo
Pablo Decoud

Centro de Publicaciones, Universidad Nacional del Litoral



Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá (CIID)

Programa: Acuíferos Regionales en América Latina
Proyecto: Sistema Acuífero Guaraní - Expte. Nro. 95-8767
Coordinador: Lic. Jorge Montaño

Instituciones Participantes

En Argentina

Universidad Nacional del Litoral.
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.
Grupo de Investigaciones Geohidrológicas.

Universidad de Buenos Aires.
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología
Cátedra de Hidrogeología

En Uruguay

Universidad de la República
Facultad de Ciencias

Equipo de Trabajo

En Argentina

Lic. Ofelia Tujchneider (Director).
Lic. Mario Fili.
Ing. Marta Paris.
Ing. Mónica D'Elia.
Ing. Marcela Perez.
Dr. Miguel Auge (Director).
Lic. María Inés Nagy.

En Uruguay

Lic. Jorge Montaño (Coordinador y Director).
Lic. Paula Collazo.
Ing. Pablo Decoud.

Presentación

La literatura especializada ha venido expresando con claridad y en forma creciente, la importancia que adquiere el conocimiento de los acuíferos para la gestión del territorio y para el mantenimiento de las condiciones de vida de sus habitantes. También muchas veces resulta un hecho corriente, la presentación de ejemplos donde se demuestra cómo el conocimiento previo sobre las condiciones de funcionamiento y sobre las potencialidades de aprovechamiento de los diferentes recursos hídricos, debería haber formado la base para el establecimiento de un régimen de administración y de control de sus usos, en una modalidad preventiva que asegurase el mantenimiento de sus cualidades y de las actividades que de él dependían.
Ante la observación de ese marco aportado por la evidencia de otras regiones, en el mes de abril de 1997 un conjunto de docentes e investigadores de Universidades del MERCOSUR firmaron en la ciudad de Paysandú, Uruguay, una declaración donde establecían la importancia del Sistema Acuífero Guaraní para el desarrollo de la región conformada por Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay. En esta declaración, los calificados firmantes han advertido, con claridad, sobre la existencia de riesgos para su conservación en condiciones adecuadas y sobre la necesidad de un nuevo "marco normativo que asegure un manejo sustentable y equitativo del recurso por los países que lo comparten".

Sin duda el desafío de lograr una forma de gestión racional y sustentable sobre un acuífero como el Guaraní, discurriendo por debajo de cuatro países de la región y traspasando en su funcionamiento los límites normativos de regulación sobre sus aprovechamientos en cada uno de esos territorios, representa, hoy en día, una clara demanda de caminos para la concertación institucional y para la definición de actuaciones. A su vez, la capacidad existente para la aplicación sobre este acuífero de diferentes tipos de aprovechamientos como el hidrogeológico termal, municipal, industrial o agrícola, lo transforman, por un lado, en un riesgo potencial de sobreexplotación de un recurso natural, y así, simultáneamente, en un factor de riesgo para el desencadenamiento de complejos conflictos sociales.
Todos estos componentes -conocimientos, bases para la regulación preventiva, gestión de uso sustentable y prevención de conflictos sociales- forman parte de los objetivos que persigue el Proyecto de Acuíferos Regionales apoyado por el CIID/IDRC. En particular, los conocimientos que se integran en la presente publicación forman parte de un amplio programa regional vinculado a este Proyecto, en el que han participado equipos científicos de la Universidad de Buenos Aires, la Universidad Nacional del Litoral (Argentina), la Universidad Federal de Paraná (Brasil), la Universidad del Pilar (Paraguay) y la Universidad de la República (Uruguay). De esta forma, en el presente libro se documentan los avances correspondientes al capítulo Argentina (Universidad Nacional del Litoral y Universidad de Buenos Aires) y al capítulo Uruguay (Universidad de la República) dentro del "Proyecto para la Gestión Sostenible del Sistema Acuífero Guaraní, en el Marco del Proceso de Integración del Mercosur" y sus aportaciones se centran esencialmente en la definición de un conjunto de bases técnicas, necesarias para el futuro desarrollo de normas legales. Como también propone la declaración de Paysandú, todos estos esfuerzos están orientados finalmente a favorecer la apertura de caminos para que "los gobiernos de la región del MERCOSUR establezcan un mecanismo de coordinación y consulta para la evaluación, investigación, planeamiento y preservación del Acuífero Internacional Guaraní". En ese sentido, el apoyo oportunamente otorgado por el CIID/IDRC, para facilitar el encuentro y fortalecimiento de estos caminos de diálogo y de aproximación del conocimiento entre la comunidad de docentes e investigadores con los ámbitos de administración y con las per-

sonas directamente vinculadas a los usos, ha podido demostrar su importante nivel de acierto ante la claridad con que se establece en esta publicación la necesidad de un debate y de un acuerdo sobre los criterios racionales para su explotación, su conservación y su gestión integrada y sustentable a nivel regional.

Dr. Carlos Seré
Director Regional
Oficina para América Latina y el Caribe CIID/IDRC

Cuando la Universidad Nacional del Litoral concreta la edición de un nuevo libro, lo percibe como la obtención de un logro, el alcance de una meta. Esta percepción es notoria porque considera la Universidad que el esfuerzo de los docentes o investigadores que publican se suma a la ya de por sí pesada tarea académica y esto es ponderable.
El presente libro cubre suficientemente esa primera expectativa y avanza mucho más allá del objetivo, trascendiéndolo en varias direcciones. Una de ellas es la integración académica regional, el sueño de hacer real esa "Universidad Virtual" definida, con acierto, como "espacio académico común ampliado". Vemos con satisfacción que a dicho anhelo cooperativo, de esta región del mundo que es el Mercosur, el libro también lo cubre con creces. Investigadores de varios países han concurrido en el proyecto "Sistema Acuífero Guaraní" demostrando una voluntad explícita de integración, reafirmando el principio holístico de sumar partes, para que el todo las supere y trascienda.
Se debe reconocer todo el apoyo brindado por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo del CANADA que, a través de su oficina para América Latina y el Caribe, hace posible esta publicación. Su prestigio institucional y su histórica prédica para mejorar las condiciones ambientales en el mundo hacen que la Universidad

Nacional del Litoral se integre con orgullo a este proyecto compartido.
Se trata de un trabajo de investigación compacto, llevado adelante con extremo rigor científico y planteado para solucionar uno de los temas más severos que enfrentará la humanidad en el próximo siglo: el abastecimiento de agua.
El marcado sesgo de protección del ambiente que se desprende del texto es también elocuente prueba de una manera de pensar en la Universidad, que revista las formas de vincular ciencia y naturaleza e intenta corregir los desaciertos causados por determinadas intervenciones del hombre, cuyas consecuencias son la actual degradación y la contaminación de los recursos naturales.
El texto explora un área de conocimiento que se encuentra en permanente desarrollo y viene a agregar material teórico de importancia, que despertará otras inquietudes en equipos que decidan plantearse similares interrogantes, como los que abordan los autores. En este camino abre nuevos rumbos, que con seguridad serán complementados y ampliados por otros investigadores en otras latitudes. Pensando en ellos, la Universidad incorpora el presente texto, que amplía su oferta editorial expresamente difundida y extendida más allá de las universidades e intereses de esta región.
Además, el libro cumple con el mayor objetivo de la Universidad, que es la trascendencia de los marcos académicos y, con vocación de servicio a la sociedad, legar a las futuras generaciones los desvelos de horas de estudio, destinadas a la búsqueda de mejores soluciones para los interrogantes que hoy acosan a la humanidad.

Arq. Hugo Storero
Rector
Universidad Nacional del Litoral. Santa Fe, Argentina.

Propuesta de Paysandú

Los abajo firmantes, docentes e investigadores de Universidades de la Región del MERCOSUR, reunidos en la ciudad de Paysandú, Uruguay, con motivo de las II Jornadas Técnico Científicas sobre Gestión Sustentable del Acuífero Internacional Guaraní y reiterando lo manifestado en las I Jornadas realizadas en Curitiba, Brasil en 1995.

CONSIDERANDO:

Que el ACUIFERO INTERNACIONAL GUARANI constituye uno de los recursos de agua dulce subterránea más importante del mundo;

Que dicha reserva es un recurso internacional compartido por los cuatro países que actualmente integran el MERCOSUR, extendiéndose en sus territorios por alrededor de 1.400.000km^2 y con un potencial hídrico del orden de 40.000km^3;

Que dicho recurso hídrico es capaz de abastecer en forma permanente a los 15 millones de habitantes del área que ocupa, así como permitir incentivar acciones de desarrollo agropecuario, industrial y turístico en toda la región;

Que constatamos que el recurso se encuentra ya en proceso de utilización sin coordinación, ni planificación, ni control en estos países, lo cual constituye un riesgo cierto de deterioro en cuanto a la calidad y disponibilidad del mismo;

Que su aprovechamiento debería enmarcarse dentro de criterios de desarrollo sustentable, basados en el conoci-

miento e investigación científica de la región;
PROPONEMOS:
1. Que los gobiernos de la región del MERCOSUR establezcan un mecanismo de coordinación y consulta para la evaluación, investigación, planeamiento y preservación del ACUIFERO INTERNACIONAL GUARANI.
2. Para ello sugerimos la implementación de un marco normativo que asegure un manejo sustentable y equitativo del recurso por los países que lo comparten.
PAYSANDU, URUGUAY, 22 de abril de 1997.
Firman por:
Argentina - Dr. Miguel AUGE (Universidad de Buenos Aires) y Lic. Mario F. FILI. (Universidad Nacional del Litoral).
Brasil - Dr. Ernani F. da ROSA FILHO (Universidad Federal de Paraná).
Uruguay - Lic. Jorge MONTAÑO e Ing. Edi W. JURI (Universidad de la República).

Prólogo

El Acuífero Internacional Guaraní, denominado así en homenaje a la Nación Guaraní porque abarca prácticamente al dominio geográfico que fue habitado por esa civilización, o "Acuífero Gigante del Mercosur", como también se le ha dado en llamar, porque se lo encuentra en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, es uno de los recursos hídricos subterráneos más importantes del planeta.

Está constituido por una sucesión de areniscas eólicas y fluviales, correspondientes a unidades formacionales de edad Triásico-Jurásica, con espesores que pueden variar desde pocos metros hasta casi mil. Las formaciones geológicas que lo integran se han detectado en un área que supera el millón de kilómetros cuadrados en las cuencas de Paraná y Chaco-Paranense; en gran parte de esa superficie están cubiertas por extensos y potentes derrames basálticos de edad Cretácica.

Sobre la base de información geológica e hidrogeológica, se ha llegado a estimar que el volumen de reservas de agua dulce almacenado en las areniscas, es del orden de los 40.000km^3. Estas rocas afloran en importantes áreas de Brasil y Uruguay, con elevada pluviosidad. Allí el acuífero es realimentado por la infiltración de parte de las lluvias que caen en la región, con un volumen estimado de 250km^3/año.

Las reservas explotables fueron estimadas en 40km^3/año.

Estas disponibilidades de agua serían suficientes para abastecer una población del orden de los 360 millones de personas, con una dotación de 300 litros por habitante por día.
Las características hidráulicas formacionales y las posibilidades de recarga hacen que en Brasil y Uruguay el aprovechamiento del acuífero haya alcanzado un importante grado de desarrollo. La utilización de las aguas subterráneas, especialmente en Brasil, está creciendo de manera exponencial en las últimas décadas, debido a su excelente calidad para consumo humano, industrial, hidrotermal, riego y, sobre todo, en función de una relación costo/beneficio altamente favorable para el tratamiento de aguas de superficie. En ese país actualmente más de 300 ciudades con poblaciones que varían entre 5.000 y 500.000 habitantes, son abastecidas por el Acuífero Guaraní.
En Paraguay y Argentina, su aprovechamiento es más reciente; por lo tanto aún hay muy pocas captaciones y todas próximas a los ríos Uruguay y Paraná.
Teniendo en cuenta la vital importancia de este recurso y la necesidad de que su aprovechamiento sustentable se fundamente en bases científicas, en el mes de abril de 1996 el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá (C.I.I.D.), acordó con las Universidades Nacionales del Litoral y de Buenos Aires, Argentina, y con la Universidad de la República de Uruguay, la participación coordinada de sus grupos de investigación hidrogeológica en el Programa "Acuíferos Regionales de América Latina", financiado íntegramente por esa Institución, con la misión de elaborar un informe sobre el estado actual del conocimiento del Acuífero Guaraní.
Para llevar a cabo la tarea, se designó Coordinador al Licenciado Jorge Montaño, de la Universidad de la República y como líderes de los grupos de investigación argentinos, a la Licenciada Ofelia Tujchneider, de la Universidad Nacional del Litoral y al Dr. Miguel Auge, de la Universidad de Buenos Aires.
El presente volumen reúne los Capítulos Argentino y Uruguayo, de las investigaciones realizadas en el marco del citado convenio.

Ofelia Tujchneider

Sumario

Capítulo argentino

Capítulo uruguayo

Capítulo argentino

Introducción

A modo de referencia es interesante reseñar cuál era el estado del conocimiento sobre el Acuífero Guaraní en Argentina, al momento de iniciarse este Programa.

Las formaciones geológicas que integran al sistema acuífero, son conocidas en Brasil, Uruguay, Paraguay y Argentina, bajo diferentes denominaciones, pero más difundidas como Basaltos de Serra Geral o de Arapey y Areniscas de Botucatú o de Tacuarembó.

En Argentina, areniscas y basaltos afloran en la provincia de Misiones y en el sector oriental de la Provincia de Corrientes; los basaltos también se encuentran aflorando en una delgada faja que acompaña a la ribera occidental del Río Uruguay, en el sector noreste de la Provincia de Entre Ríos.

La distribución areal y características de estas formaciones en el subsuelo se conoce desde los años 30 a través de perforaciones realizadas por el Ferrocarril, la antigua Dirección de Minas y Geología y Yacimientos Petrolíferos Fiscales (YPF). Esta empresa realizó un gran número de perforaciones profundas y prospección sísmica, para exploración de hidrocarburos, en territorio de las provincias de Entre Ríos, Chaco, Santa Fe, Córdoba, Santiago del Estero y Formosa. Si bien los datos básicos permanecieron durante mucho tiempo en reserva, las características geológicas de la cuenca fueron difundidas a través de valiosos aportes de los geólogos petroleros.

En lo que respecta a información sobre aguas subterráneas, sólo en el importante trabajo realizado por Stappenbeck (1926) se proporcionan pocos datos sobre la presencia de agua salada en capas de areniscas, en las perforaciones de Tostado y San Cristóbal, provincia de Santa Fe.
Si bien se vislumbraba la posibilidad de encontrar en territorio argentino los niveles productivos de aguas calientes explotados en las termas de Arapey, Guaviyú y Daymán, al este del Río Uruguay, pasó mucho tiempo para que se emprendieran estudios orientados al posible aprovechamiento del recurso.
En un informe realizado por uno de los autores (Filí) en 1984 para la Dirección de Minería de la Provincia de Entre Ríos, y en un trabajo posterior de Tujchneider y Filí (1988), se indicaba que el área a perforar con mayores probabilidades de éxito era la localizada entre las nacientes del Arroyo Feliciano y el Río Uruguay.
A fines de 1987, por convenio con la Dirección de Minas de la Provincia de Entre Ríos, la Sociedad del Estado Nacional -Agua y Energía Eléctrica- realizó estudios mediante prospección geoeléctrica con el propósito de conocer mejor las posibilidades acuíferas de las areniscas infrabasálticas, en las inmediaciones de Colón, El Palmar, Concordia y Federación. También, para control, se realizó prospección eléctrica en Villaguay y Nogoyá, sitios con información geológica por perforaciones. Estos estudios corroboraron la profundización del techo de los basaltos de norte a sur y de este a oeste, la presencia de horizontes conductivos por debajo de los basaltos y posibles controles estructurales.
Con posterioridad a 1990 se despertó un gran interés por conocer las posibilidades de alumbrar aguas termales en los municipios de varias ciudades ribereñas. Se contrataron estudios de prospección (métodos geoeléctricos y magneto telúricos) en Federación, Villa Elisa, Concordia y San José. Luego se realizaron perforaciones infrabasálticas en Federación, Concordia, Colón, Villa Elisa y Concepción del Uruguay. Al iniciarse estos estudios se habían concluido las tres primeras, y se encontraban en ejecución las dos últimas.

Tareas desarrolladas

En concordancia con las finalidades establecidas para esta fase de determinación del estado actual del conocimiento sobre el Acuífero Guaraní, las tareas desarrolladas comprendieron básicamente tres aspectos:

- Recopilación de información geológica e hidrogeológica sobre el subsuelo de las cuencas de Paraná y Chaco-Paranense, constituida por trabajos publicados e informes inéditos, descripciones de perforaciones profundas, datos hidroquímicos antecedentes; etcétera.
- Campaña de obtención de información y toma de muestras de agua en captaciones infrabasálticas en Argentina y Uruguay. La extensión de las observaciones al este del Río Uruguay se efectuó con el propósito de contar con mayores elementos de juicio para evaluar los pocos e incompletos datos que se obtenían de las captaciones realizadas y en ejecución del lado argentino, y su relacionamiento. Se presenta documentación fotográfica referida al trabajo de campo realizado.
- Revisión y procesamiento de la información.

En síntesis, se ficharon y consultaron más de 30 trabajos, que se citan en la bibliografía; se obtuvieron datos completos o parciales de 40 perforaciones distribuidas en las provincias de Buenos Aires, Córdoba, Corrientes, Chaco, Entre Ríos, Formosa, Santa Fe y Santiago del Estero. También se consultaron perfiles de perforaciones e información

hidroquímica de Uruguay. En campaña se obtuvo información directa sobre las captaciones en Federación, Concordia, Colón, Villa Elisa y Concepción del Uruguay (Argentina) y Almirón, Daymán, Guaviyú y Arapey (Uruguay). Se pudo obtener muestras de agua y registrar la temperatura en Federación, Colón, Villa Elisa, Almirón, Daymán, Guaviyú y Arapey. En la Figura 1 se muestra la distribución de las perforaciones consultadas, que contienen información de interés para este estudio.

El Tema Geología Regional del presente capítulo fue desarrollado por Miguel Auge y María Inés Nagy de la Universidad de Buenos Aires. El resto del temario fue desarrollado por el Grupo de Investigaciones Geohidrológicas de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral.

Algunos de los sitios visitados durante la campaña



Concepción del Uruguay
(Argentina)



Concepción del Uruguay
(Argentina)



Villa Elisa:
vista de la perforación



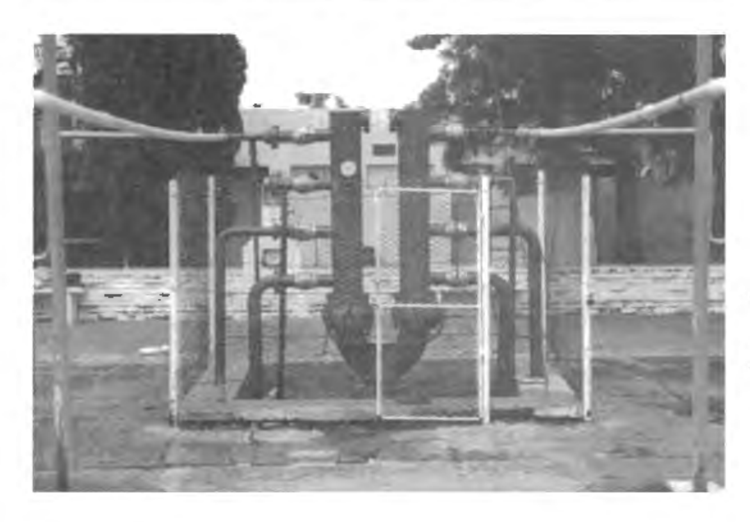
Villa Elisa:
detalle de la surgencia



Termas de Arapey (Uruguay):
vista general
del complejo termal



Termas de Arapey (Uruguay):
vista general de sala
de bombas



Termas de Guaviyú (Paysandú, Uruguay):
vista general
de la perforación



Termas de Almirón (Uruguay):
detalle de la perforación



Termas de Daymán (Uruguay):
detalle de la perforación



Federación (Argentina)

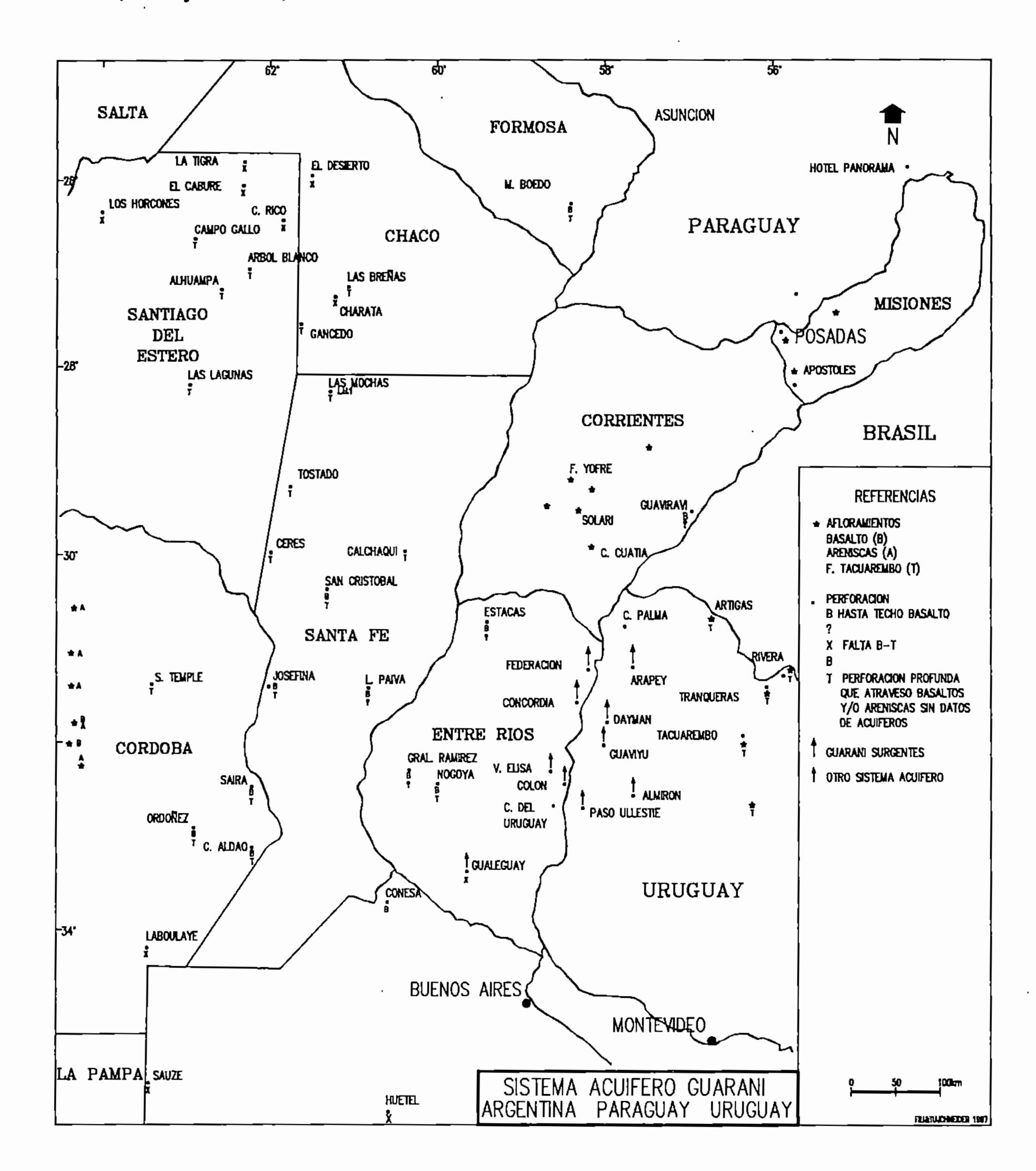


Termas de Federación (Argentina):
toma de muestra en la perforación



Colón (Argentina):
vista de la perforación

Figura 1. Mapa de ubicación de las perforaciones consultadas.
M. Fili, O. Tujchneider, 1997.



Hidrometeorología regional

Las principales áreas de recarga del acuífero se encuentran en territorio de Uruguay y Brasil, donde las precipitaciones son del orden de los 1200mm en Tacuarembó y más de 2400mm en Serra Geral.
Si bien en gran parte del territorio argentino las areniscas infrabasálticas, acuíferas o potencialmente acuíferas, se encuentran en el subsuelo a profundidades que las desvinculan totalmente del arco meteórico del ciclo hidrológico, dado que tanto en el noreste (Misiones y Corrientes), como en el oeste (Córdoba y Santiago del Estero) hay afloramientos de areniscas semejantes a las que forman al acuífero, se estimó de interés analizar la disponibilidad de agua meteórica a nivel regional como indicador de la factibilidad de recarga, en el supuesto caso de que exista continuidad hidráulica como ocurre al este del Río Uruguay.
Con ese propósito se analizaron datos de precipitaciones y temperaturas medias mensuales correspondientes a las doce estaciones meteorológicas de la República Argentina que se listan en la Tabla 1. Sobre esa base se efectuó, para cada una de las localidades estudiadas, el balance hídrico medio anual aplicando el método de Thornthwaite y Matter.
En la Figura 2 se muestran los histogramas con la distribución anual promedio de las precipitaciones. Las mayores se dan en las estaciones Posadas, Corrientes y Concordia, con registros medios anuales de 1711, 1402 y 1358mm,

respectivamente. Santiago del Estero registra la menor precipitación media anual con 614mm.
La graficación de la distribución anual media de las precipitaciones y de las temperaturas muestra que en la mayoría de las estaciones los períodos más lluviosos se corresponden con los de mayor temperatura. Solamente en la estación Posadas, con precipitaciones medias mensuales que varían entre 100 y 180mm, no se distinguen períodos secos a lo largo del año.
Las mayores temperaturas medias anuales se registran en las estaciones Las Lomitas, Posadas y Corrientes, superando los 20ºC. La menor temperatura media anual corresponde a la estación Villa Angela, inferior a 14ºC.
Como resultado del balance hídrico, en las estaciones Concordia, Corrientes, Gualeguaychú, Paraná, Posadas, y Villa Angela, es decir las ubicadas en el sector oriental de la región, se observan excesos medios anuales que varían de este a oeste desde 640mm hasta 140mm. La estación Posadas registra el mayor exceso medio anual; esto es muy importante dado que allí se hace efectiva la recarga de los acuíferos, tanto en areniscas como en basaltos fisurados. En las estaciones Las Lomitas y Santiago del Estero hay déficits hídricos medios anuales de 330 y 430mm respectivamente. De este análisis, puede apreciarse que en el sector occidental de la región, aunque haya areniscas aflorantes, las condiciones hidrometeorológicas no son favorables para la formación de acuíferos con las características que éstos presentan al este del Río Paraná. Figuras 3 y 4.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas y períodos de medición de precipitaciones y temperaturas

Estación	**Provincia**	**Período**
Villa Angela	Chaco	1961-1990
Córdoba	Córdoba	1961-1993
Laboulaye	Córdoba	1941-1990
Corrientes	Corrientes	1962-1993
Concordia	Entre Ríos	1963-1993
Gualeguaychú	Entre Ríos	1961-1993
Paraná	Entre Ríos	1961-1993
Las Lomitas	Formosa	1961-1993
Posadas	Misiones	1961-1993
Ceres	Santa Fe	1961-1993
Rafaela	Santa Fe	1936-1991
Santiago del Estero	Santiago del Estero	1961-1993

Figura 2. Distribución Anual promedio de las precipitaciones.
M. D'Elia, M. Pérez, 1997.

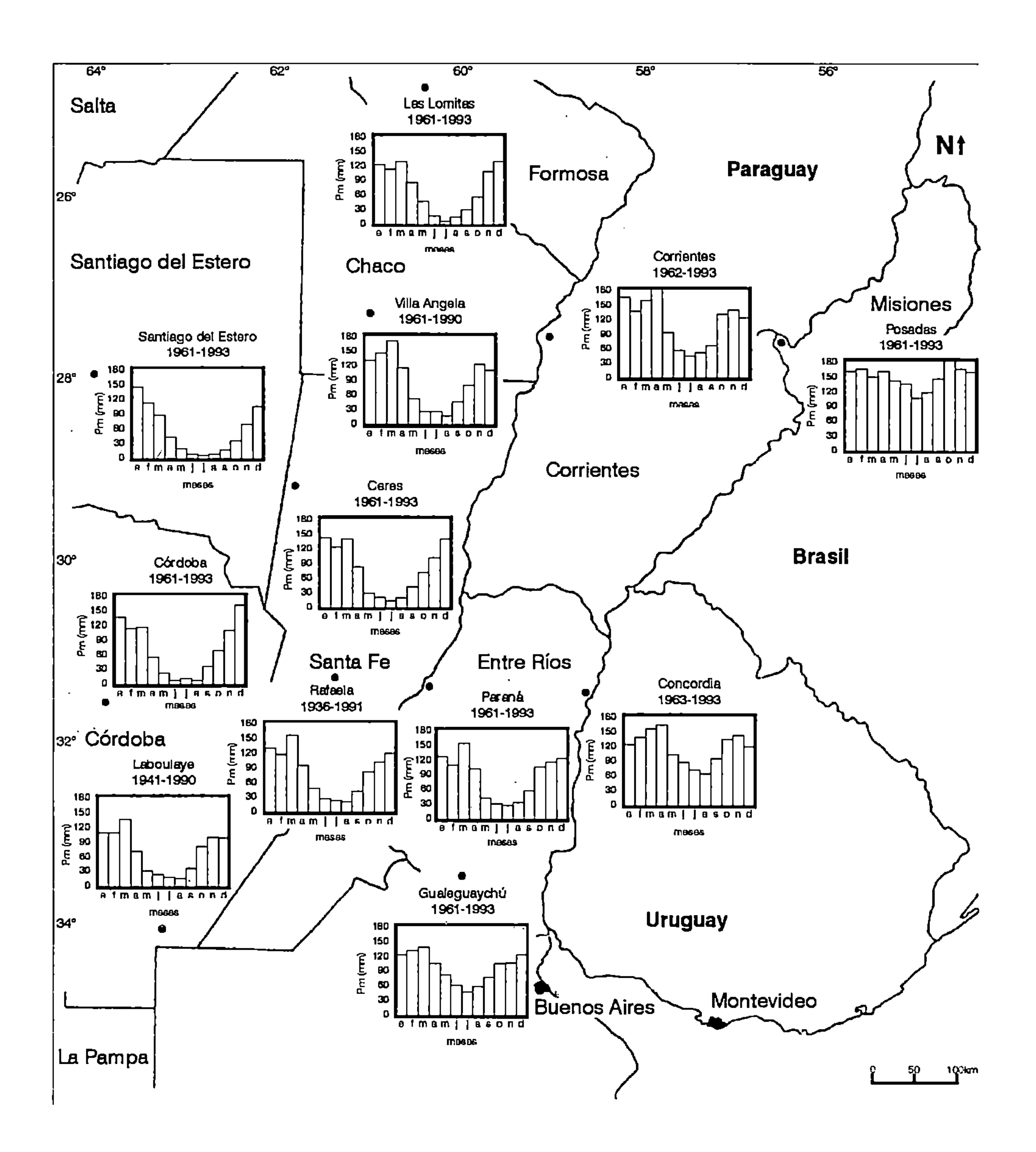
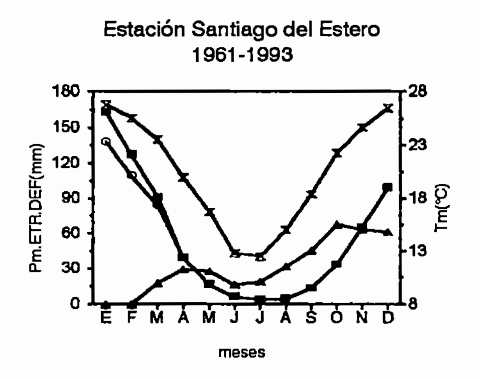
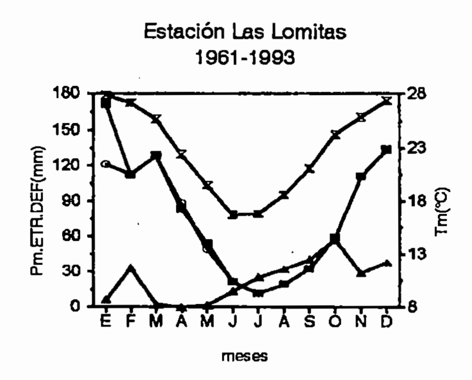
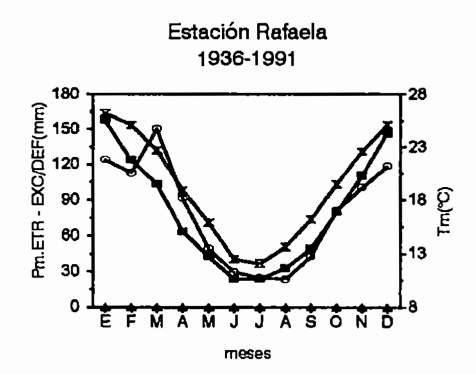
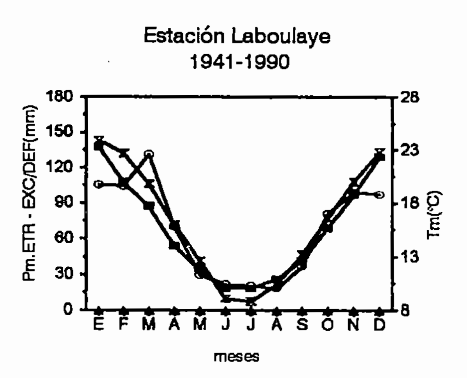


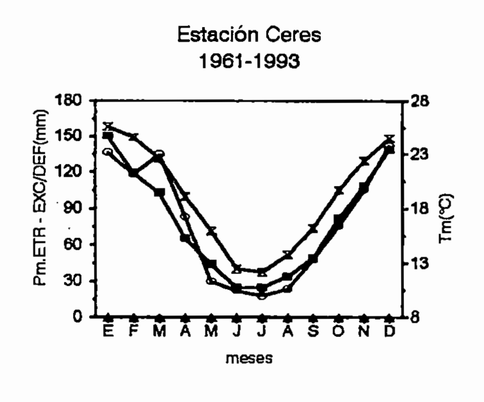
Figura 3. Distribución media anual de precipitación, temperatura, evapotranspiración real, excesos y déficits.

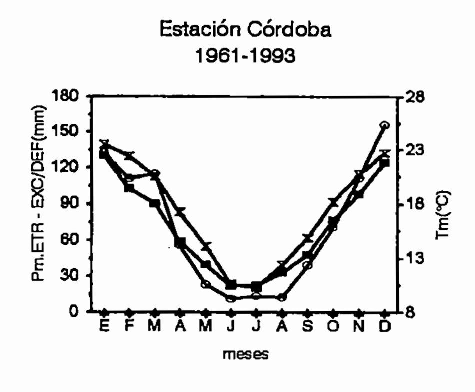






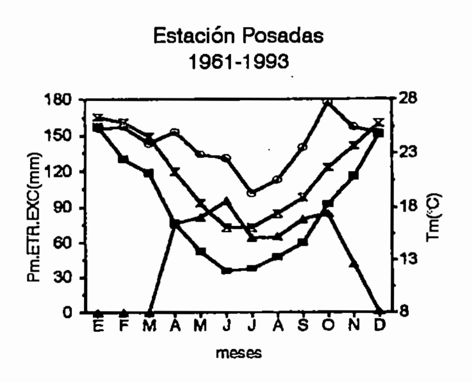


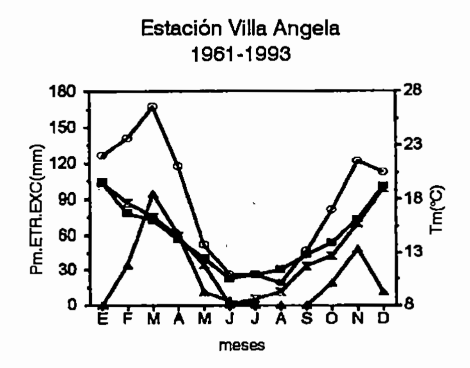


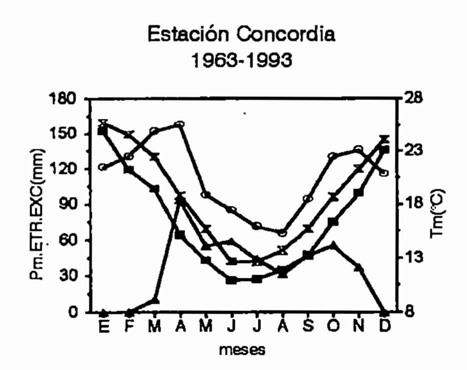


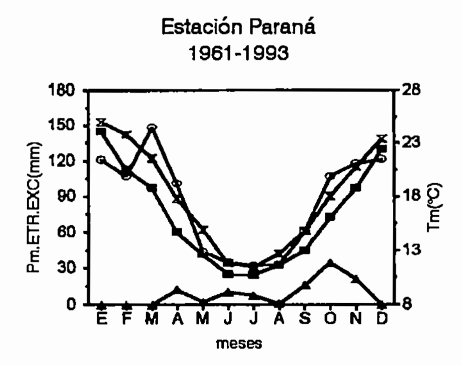
○ Pm ■ ETR ▲ EXC/DEF ⧗ Tm

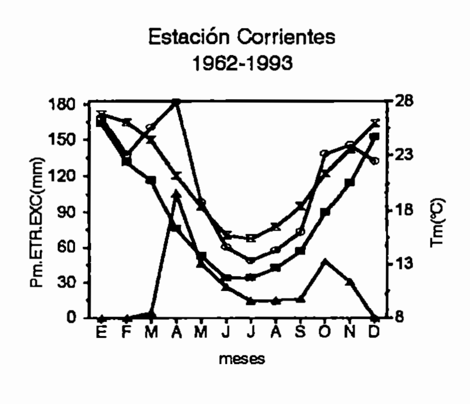
Figura 4. Distribución media anual de precipitación, temperatura, evapotranspiración real, excesos y déficits.

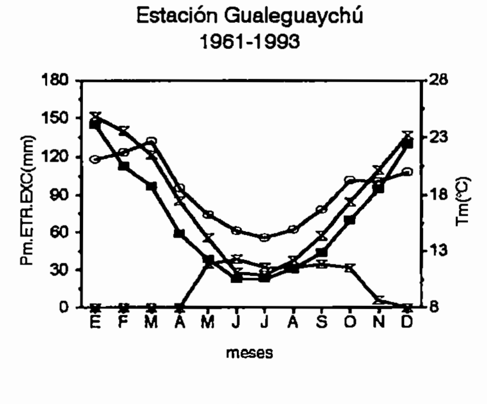












○ Pm ■ ETR ▲ EXC/DEF ⧗ Tm

Geología regional

Las Areniscas de Tacuarembó (Uruguay) o Formación Botucatú (Brasil) o Formación Misiones (Argentina y Paraguay), son un conjunto de areniscas, generalmente bien seleccionadas, de tonalidad rojiza, de friables a bien litificadas, de grano fino a mediano, con frecuente laminación diagonal, que se ubican inmediatamente por debajo de la Formación Serra Geral (Basaltos de Serra Geral o Lavas de Arapey o Formación Curuzú Cuatiá).

En la República Argentina, ocupan parte de la Cuenca Chacoparanense, disponiéndose en el subsuelo de la Mesopotamia y ámbito vecino (centro y Norte de Santa Fe, Este de Córdoba, Sur del Chaco y centro y Este de Santiago del Estero). En Corrientes, afloran en sectores reducidos del centro y Sur de la provincia, pero manteniendo su predominio en el subsuelo. Finalmente, en Misiones se manifiestan en superficie entre Corpus y Santa Ana y cubren una superficie bastante mayor en el Paraguay (Figuras 5 y 6).

En la Figura 7 se reproduce la disposición geotectónica regional, que controló la evolución geológica del ámbito estudiado. En ella se aprecia que la fracturación dominante es de tipo transcurrente con planos de alto ángulo, orientados NW-SE y bloques que se van hundiendo hacia el centro de la Mesopotamia, dando lugar a una estructura del tipo "graben" o fosa tectónica.

Estratigrafía

Se efectúa una somera descripción de las unidades estratigráficas más antiguas y más modernas que las Areniscas de Tacuarembó, prestándole especial atención a estas últimas, debido a que contienen al Acuífero Guaraní, que constituye uno de los recursos de agua subterránea dulce más importantes del Planeta.

Proterozoico

Se incluye con esta denominación a un variado conjunto de rocas ígneas y metamórficas, identificadas en afloramientos y también en subsuelo, mediante perforaciones, con la condición de que se les sobrepongan rocas de probada edad paleozoica. Esta limitación deriva de la escasez de dataciones y de conocimiento respecto a la edad del conjunto ígneo-metamórfico.

En la Figura 7 se indican los sitios donde se ubicaron las rocas proterozoicas, su tipo petrológico, la profundidad de yacencia y la unidad estratigráfica sobrepuesta.

Gondwana

Comprende un conjunto de rocas sedimentarias que abarcan el lapso desde el Carbónico Superior hasta el Pérmico Inferior, a las que se separa en tres formaciones que en sentido de edad decreciente son: Sachayoj, Charata y Chacabuco.

La primera, del Carbónico Superior, está formada por arcilitas castaño - oscuras a gris claras, con intercalaciones en la sección superior de areniscas blanquecinas a ligeramente verdosas, que se disponen discordantemente sobre rocas del Devónico al Proterozoico.

La Formación Charata, también del Carbónico Superior y que involucra a los términos Palermo, Bonito e Itararé, de Uruguay y Brasil, está constituida por sedimentitas glaciales y fluvioglaciales, con lutitas, limolitas y calizas grises en su tramo cuspidal.

La Formación Chacabuco, del Pérmico Inferior, es equivalente a las formaciones Terezinha, Estrada Nova e Iraty y es producto de una sedimentación marina representada por arcilitas y lutitas grises en su tramo basal y por limolitas arenosas, rojizas, de origen continental, en las secciones media y superior.

Los depocentros sedimentarios del Gondwana están desplazados al Oeste, fuera de la Mesopotamia, superando en conjunto 2.000m de espesor.

Figura 5. Mapa geológico regional.
COMIP, 1981.

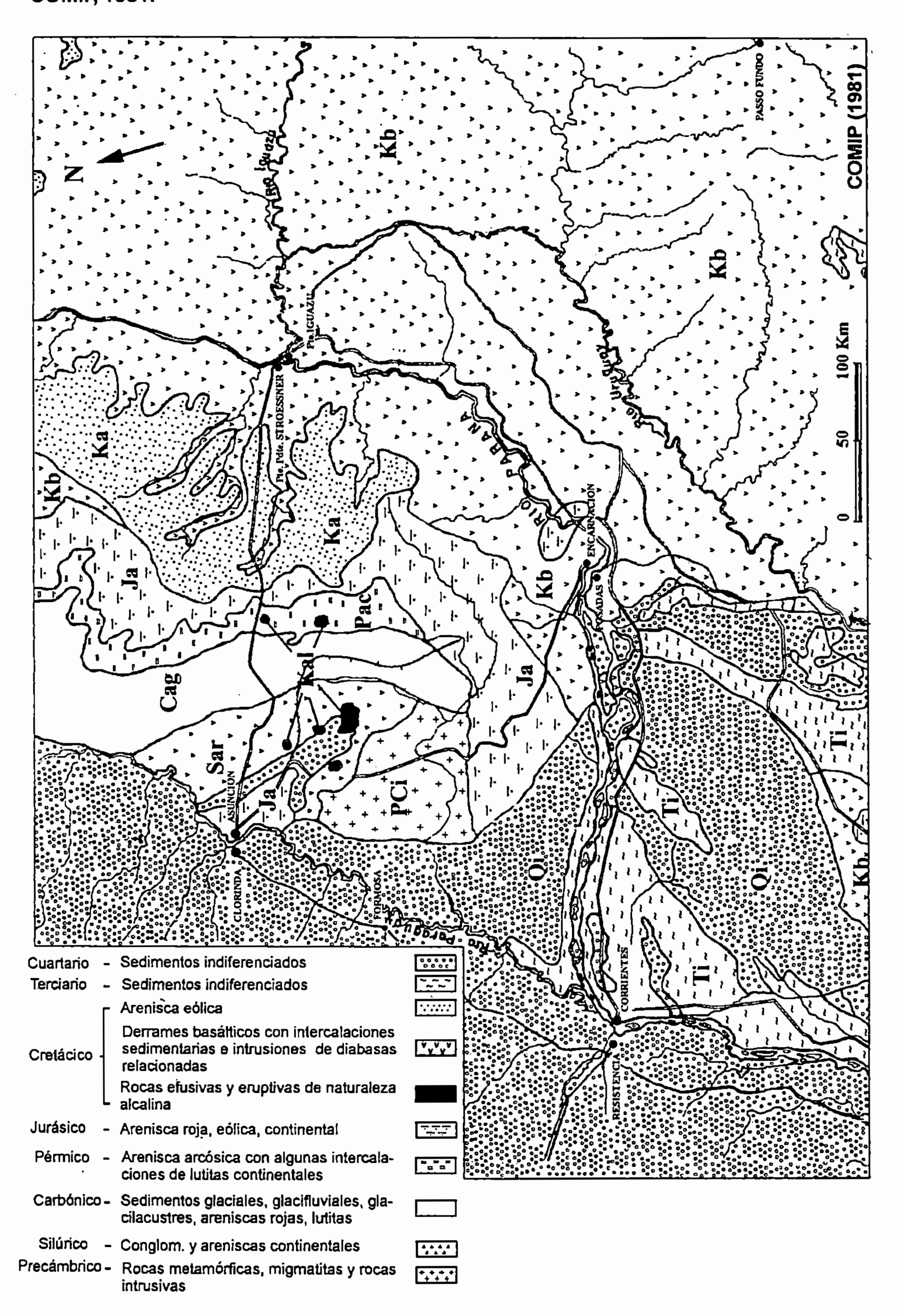
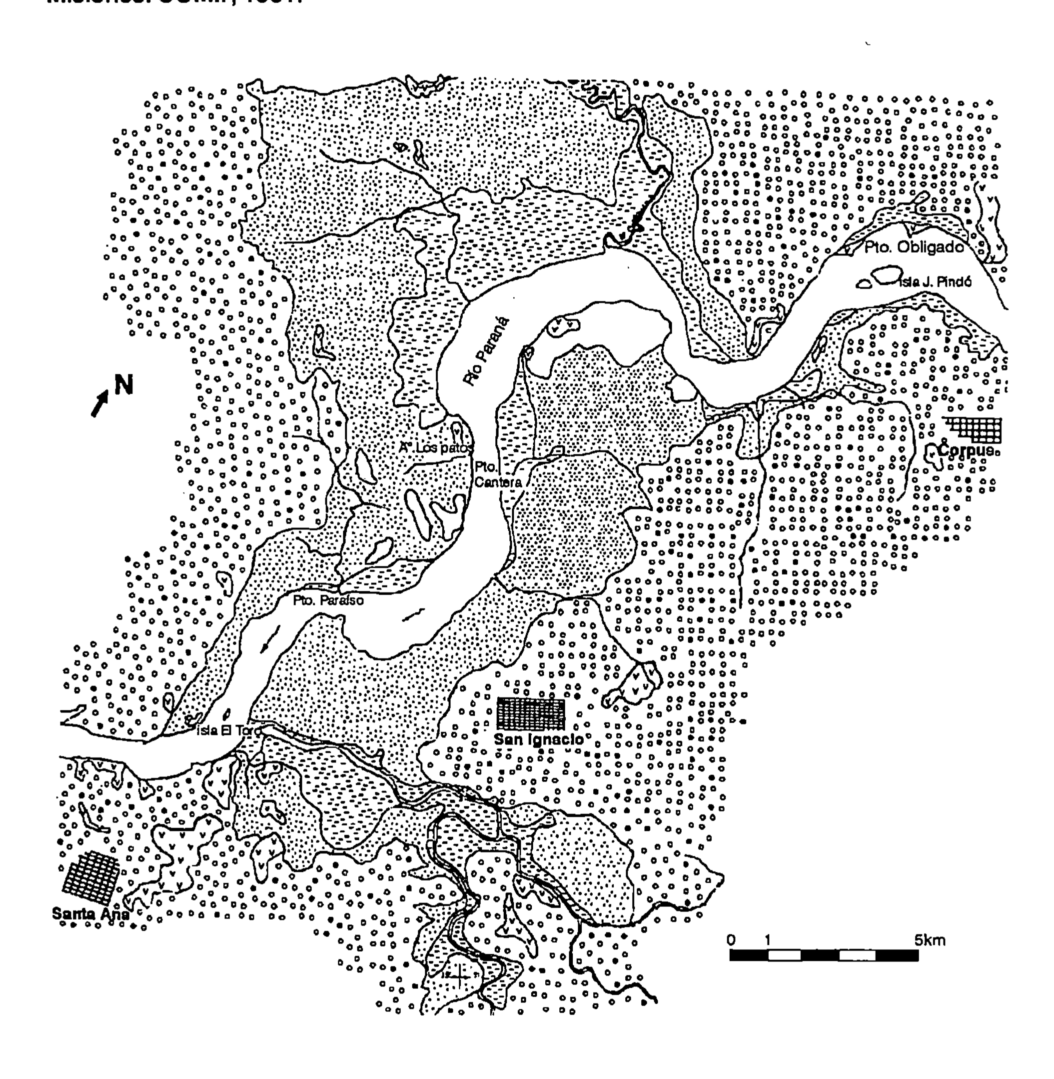


Figura 6. Mapa geológico detallado.
Misiones. COMIP, 1981.



Referencias

- Suelo residual (laterita).
- Arcilla arenosa aluvial.
- Fm. Serra Geral (basalto)
- Fm. Misiones (arenisca)

PARAGUAY
FORMOSA
S.M. de TUCUMAN
S. del ESTERO
RAMAL CORDOBES ORIENTAL CHARATA
CATAMARCA
RESISTENCIA
CORRIENTES
POSADAS
BRASIL
ARGENTINA
CORDOBA
SANTA FE
PARANA
SAN LUIS
URUGUAY
OCEANO ATLANTICO SUR
BUENOS AIRES
LA PLATA
Río de la Plata
MONTEVIDEO
64° Oeste de Greenwich
60°
56°
52°
0 100 200 300 km

Referencias

- Gneis, filita y esquistos cloríticos.
- Gabbro.
- Granito y pórfidos.
- Ordovicico.
- Devónico.
- Fallas.
- Perforaciones.

Figura 7. Mapa geotectónico.
Padula, 1972

Formación Buena Vista (Triásico Superior)

Litológicamente es muy similar a la Formación Tacuarembó, de la que se distingue, pues entre ambas parece existir una discordancia. Sin embargo, dado que es prácticamente imposible diferenciarlas en el subsuelo, se las agrupa en una misma unidad, a la que se denomina Formación Tacuarembó o Formación Misiones, equivalente a la Formación Botucatú de Brasil. En este sentido resulta importante señalar que las relaciones estratigráficas entre estas dos unidades y probablemente con una tercera, aún no han podido aclararse con certeza en Brasil ni en Uruguay, países en que los afloramientos y las secciones expuestas son mucho más extensos y completos que en Argentina.

Formación Tacuarembó = Formación Misiones (Jurásico Superior - Cretácico Inferior)

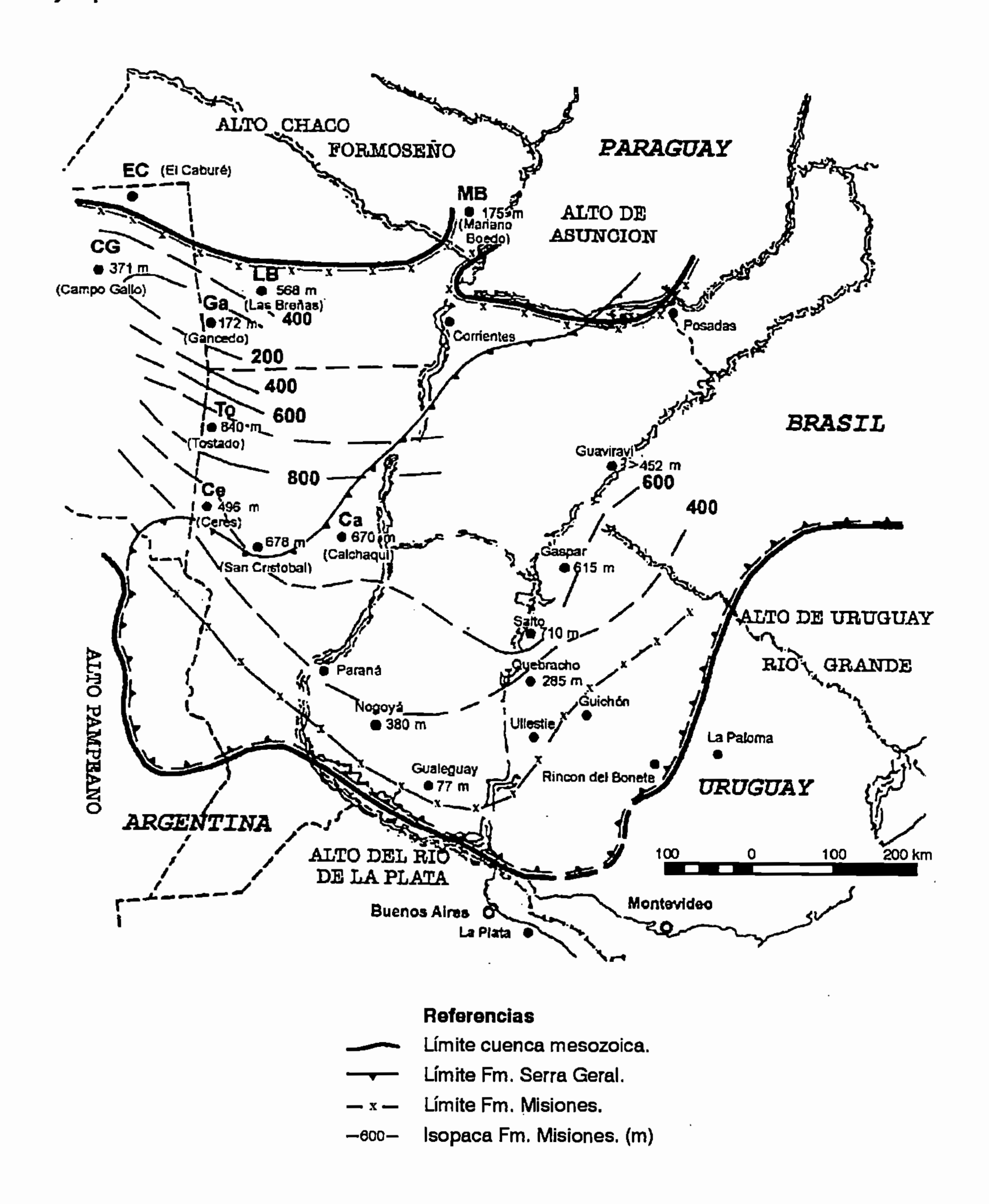
Al igual que Buena Vista, son areniscas rojizas, finas a medianas, bien seleccionadas, con frecuente estratificación entrecruzada, que indica, junto al grado de selección, un origen eólico. La consistencia va de friable a bien litificada, hecho que tiene gran importancia en lo referente a la admisión y transmisión de agua. En efecto, las areniscas friables tienen porosidad y permeabilidad primarias, por lo que se constituyen en buenos reservorios para el almacenamiento y la producción de agua subterránea. Como contraparte las que están litificadas, sólo pueden almacenar agua en superficies de debilidad mecánica (grietas, fisuras, diaclasas, estratificación), lo que deriva en acuíferos discontinuos, heterogéneos y anisótropos y en una baja capacidad de almacenamiento y productividad.

Las Areniscas de Tacuarembó suelen presentar esta última característica cuando se interdigitan con los Basaltos de Serra Geral, o en la vecindad del contacto entre ambos, debido al endurecimiento por termometamorfismo.

En la Figura 8 se indica la distribución areal de la unidad, cuya edad es asignada generalmente al Jurásico Superior o al Cretácico Inferior. Como se aprecia, ocupa un sector algo más reducido que el correspondiente a la Formación Serra Geral, en el sector Sur de la Mesopotamia, pero hacia el NW ingresa en las provincias de Santa Fe, Santiago del Estero y Chaco.

El mayor espesor se registra en Tostado (Santa Fe) con 840m, mientras que hacia el N se produce una rápida disminución de su potencia, con sólo 172m en Gancedo (Chaco).

Figura 8. Extensión de las unidades mesozoicas y espesor de la Formación Misiones.



Referencias

Límite cuenca mesozoica.
Límite Fm. Serra Geral.
Límite Fm. Misiones.
—600— Isopaca Fm. Misiones. (m)

En la Figura 6 se indica el ámbito de afloramiento en Misiones, entre Corpus y Santa Ana. San Ignacio, localidad ubicada entre las anteriores, se abastece de agua potable mediante 3 pozos de 60 a 70m de profundidad, terminados en las Areniscas de Misiones, que producen alrededor de $10m^3/h$ cada uno, con una depresión de unos 5m y una salinidad total del orden de 200mg/l.
Dado la existencia de roca basáltica por debajo de la cubierta laterizada, prácticamente en todo el territorio provincial, el Acuífero Guaraní constituye el recurso subterráneo más valioso de Misiones. Sin embargo, es muy poco lo que se ha investigado y por ende se conoce respecto a sus características y comportamiento hidrogeológico.

Formación Serra Geral (Cretácico Medio)

También conocida como Lavas de Arapey (Uruguay) o Formación Curuzú Cuatiá (Argentina).
Constituyen la efusión basáltica de mayor extensión mundial, ocupando alrededor de 1 millón de km^2 en territorio argentino, uruguayo, paraguayo y brasileño, con un volumen estimado de $350.000km^3$.
Las vías de salida fueron las megafracturas transcurrentes que seguramente alcanzaron grandes profundidades, probablemente hasta el manto.
Petrológicamente se trata de basaltos toleíticos compuestos por augita, labradorita, magnetita y piroxenos y como accesorios apatita, olivina, biotita y hornblenda. La textura dominante es de grano fino a afanítica, rara vez porfírica y la tonalidad más común gris-oscura a negra.
Se apoyan sobre la Formación Misiones, presentando coladas individuales que varían entre 1 y 80m de espesor, separadas por brecha basáltica, arenisca o metacuarcita. El máximo espesor conocido hasta el presente, se registró en Epitasio Pessoa (San Pablo) con 1.530m. En Posadas se perforó 500m sin alcanzar la base y en el pozo Salto 1, que tiene 995m, se atravesaron también 12 capas de arenisca, pero que en conjunto no superan 25m de potencia.
Los Basaltos de Serra Geral carecen de porosidad y permeabilidad primarias, por lo que el agua sólo puede almacenarse y transmitirse en y a través de fisuras abiertas (diaclasas) u oquedades intercomunicadas (alvéolos). Las brechas y areniscas intercaladas, también constituyen vías preferenciales para la circulación subterránea.
El diaclasamiento que afecta al sector central de cada colada es dominantemente subvertical y puede estar abierto, cerra-

do o sellado generalmente con clorita lo mismo sucede con las diaclasas subhorizontales que se presentan en las vecindades del techo y del piso de cada colada.
La edad de los basaltos conspira respecto a su aptitud hidrogeológica, pues la litificación y la precipitación de sustancias solubles, generan cerramientos de las oquedades (alvéolos) y/o fisuras (diaclasas).
No se han identificado pozos que produzcan caudales elevados en esta unidad y, al respecto, puede mencionarse como de alta productividad a aquel que erogue $5m^3/h$.

Cenozoico

Está formado por sedimentos de variado tipo y origen, que abarcan el lapso desde el Oligoceno Superior al Reciente.
El Oligoceno Superior está representado por calizas y el Mioceno Inferior a Medio por limolitas, generalmente acumuladas en cuencas cerradas.
Presentan una amplia difusión, psamitas marinas y continentales del Mioceno Superior al Plioceno Medio y areniscas y psefitas del Plioceno Superior al Pleistoceno Inferior.
Limos y arcillas dominan en el Pleistoceno Medio a Superior, cubriendo también grandes extensiones. Por último el Holoceno y el Reciente están representados por fangos sapropélicos, psefitas aterrazadas, limos y arcillas de los suelos comunes y de los lateríticos y limos y arenas finas dispuestos en las márgenes de los grandes cursos fluviales y sus principales afluentes.
Salvo en la Provincia de Misiones, donde el basalto aflora prácticamente en su totalidad, en el resto de la Mesopotamia es precisamente de los sedimentos cenozoicos de donde se obtiene el agua subterránea que se utiliza para consumo humano, industrial y riego, dado que en general contienen acuíferos someros y de buena productividad y calidad.

Hidrogeología regional

Columna hidroestratigráfica regional

Con el propósito de establecer la localización del Acuífero Guaraní en la columna hidroestratigráfica regional, y dado que hasta el presente sólo se lo ha encontrado en perforaciones infrabasálticas realizadas en la Provincia de Entre Ríos, se expone aquí el cuadro estratigráfico e hidrogeológico de la provincia. El mismo, tomado de trabajos precedentes de Fili y Tujchneider, representa también a gran parte de la región mesopotámica y del subsuelo de la llanura Chaco - Pampeana; las perforaciones que alcanzaron al Acuífero Guaraní en Entre Ríos confirman lo que se propuso conceptualmente hace más de 10 años, sobre la base de un riguroso análisis de información geológica: "...Existe la posibilidad que, en el sector noreste de Entre Ríos, por debajo de los basaltos, se localicen areniscas acuíferas como ocurre en el este del Río Uruguay, con baja salinidad, caudales elevados y a profundidades mayores de 1.000 metros". (Tujchneider y Fili, 1988).

En la Tabla 2 se describen en forma sintética las unidades formacionales que componen la columna hidroestratigráfica de la región.

Distribución regional de los basaltos

Como puede observarse en el mapa de isobatas de su techo (Figura 9), desde las zonas de afloramientos en todo Misiones, sector centro oriental de Corrientes y faja nororiental de la provincia de Entre Ríos, los basaltos se van profundizando hacia el oeste. También en esa dirección y hacia el sur se va reduciendo el espesor. En el perfil geológico esquemático E-W (Figura 10) se ha reproducido la morfología del techo sobre la base de unas pocas perforaciones profundas y sísmica.

En toda el área de afloramientos, los basaltos se encuentran muy diaclasados y en parte alterados, dando lugar a la presencia de acuíferos portadores de agua de buena calidad y, en general, con rendimientos modestos.

Distribución regional de las areniscas

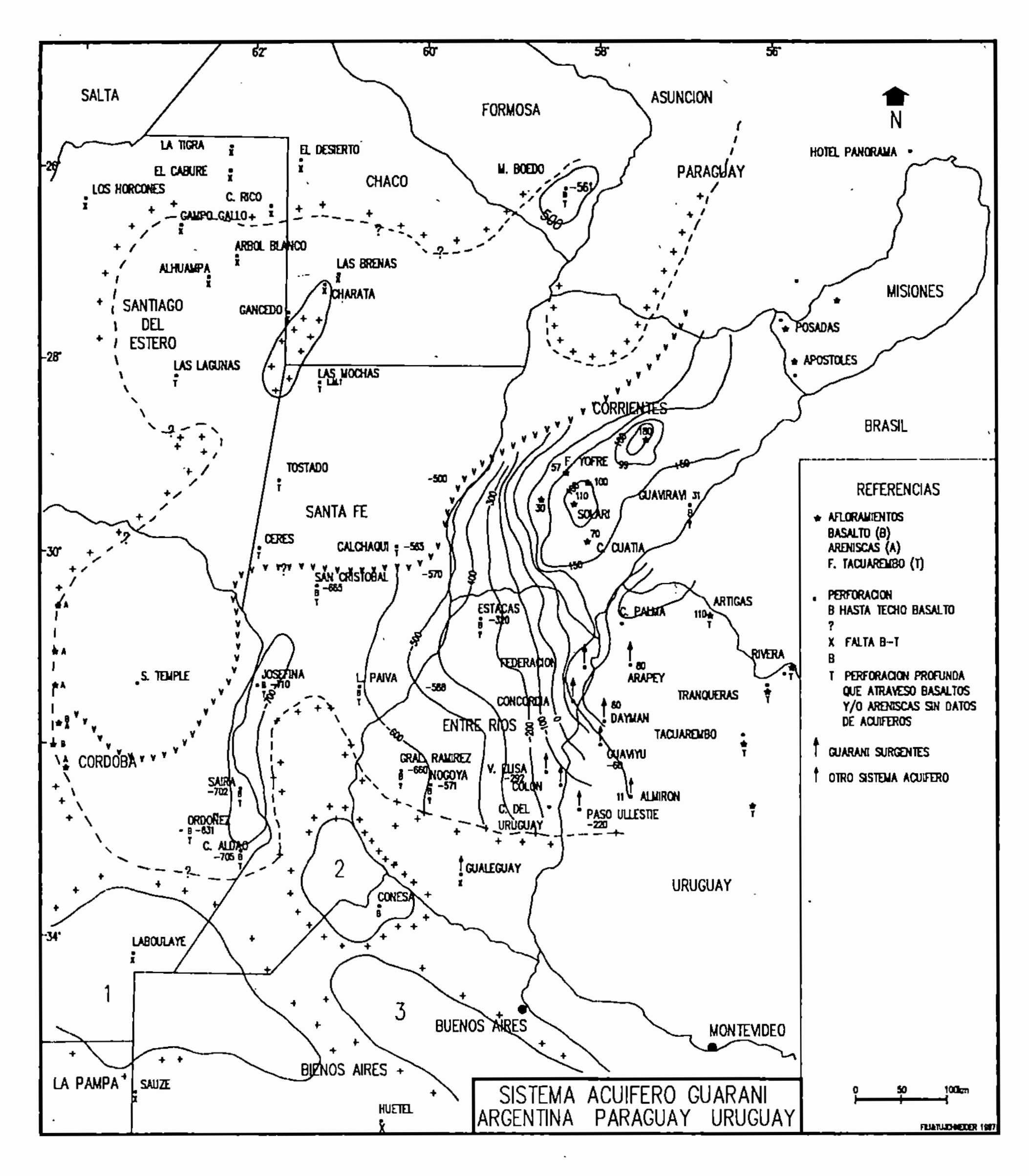
Aflorando en Misiones y Corrientes e intercaladas entre coladas de basalto hay capas de areniscas, en algunos casos acuíferas; hasta el presente se desconoce si estas areniscas tienen relación con aquéllas indudablemente infrabasálticas. La reconstrucción de la morfología del techo de las areniscas localizadas por debajo de los basaltos (Figura 11) muestra una variación espacial distinta a la de éstos. En territorio de la provincia de Entre Ríos, el techo de las areniscas infrabasálticas desciende de noreste a sudoeste, desde cotas -600m hasta -1.300m en la zona de Nogoyá-General Ramírez y desaparecen más al sur por razones estructurales, como también puede observarse en el perfil geológico-hidrogeológico esquemático N-S (Figura 12). Este perfil, elaborado con los pocos datos de perforaciones en la margen derecha del río Uruguay y extrapolaciones de lo que se conoce de la ribera derecha, muestra la desaparición de las areniscas al sur de Colón.

En la zona limítrofe entre Santa Fe y Córdoba, coincidentemente con fallas regionales, el techo de las areniscas se encuentra a cotas por debajo de -900m y allí se dan los mayores espesores, como ocurre en Josefina, con más de 1.000m. Desde allí hacia el oeste el techo de las areniscas va subiendo, encontrándose en la perforación Santiago Temple a cota -355m. En el faldeo oriental de las Sierras de Córdoba afloran areniscas del Cretácico (Formación Saldán). Probablemente éstas, debido a discontinuidades estructurales, tampoco estén interconectadas con las detectadas en profundidad mediante perforaciones.

Tabla 2. Columna hidroestratigráfica

Edad	Formación	Características	
Pleistoceno	Pampa, Hernandarias y equivalentes	Limos y arcillas. Acuiferos de mediano a bajo rendimiento.	
Plioceno	Salto, Salto Chico, Ituzaingó, Puelches	Arenas fluviales, finas y medianas. Gravas. Acuíferos de alto rendimiento.	
Mioceno	Paraná y equivalentes	Arenas y arcillas de origen marino.	
Oligoceno	Fray Bentos y equivalentes	Arcillas pardas yesíferas. Acuitardo-acuícludos con intercalaciones de acuíferos salinizados.	
Eoceno	Chaco	Areniscas y arcilitas rojizas	
Paleoceno	Mariano Boedo		
Cretácico	Guichón Mercedes, Asencio=Yerúa, etc.	Predominantes areniscas y arcilitas pardas yesíferas.	
	Serra Geral = Arapey = Curuzú Cuatiá	Basaltos. Espesor hasta 150m.	
Jurásico	Botucatú = Tacuarembó (+ Rivera + Cuchilla Ombú), Misiones	Areniscas, eólicas, finas, cuarzosas de granos bien redondeados, color rojizo.	**Acuífero Guaraní**
Triásico	Piramboia = Buena Vista = Yaguarí	Sedimentitas areno-arcillosas, lacustres, fluviales y eólicas.	
Paleozoico	Formaciones varias	Predominan sedimentitas de origen marino y glaciario.	

Figura 9. Mapa de isobatas del techo de basaltos.
M. Fili, O. Tujchneider, 1997.



LIMITES DE CUENCAS-ISOBATAS TECHO DE BASALTOS (ELABORACION PRELIMINAR)

Referencias:

1) Cuenca de Laboulage
2) Cuenca de Rosario
3) Cuenca del Salado

+?+ Altos estructurales (adaptado de antecedentes*)
v?v limites de basaltos (en subsuelo inferido)
——500—— Isobata
*)Zambrano (1974 – 1981); Padula (1972); Russo – Ferello – Chebli (1979); Lesta (1995); Yrigoyen (1975)

Figura 10. Perfil geológico-hidrogeológico esquemático, Este-Oeste. M. Fili, O. Tujchneider, 1997.

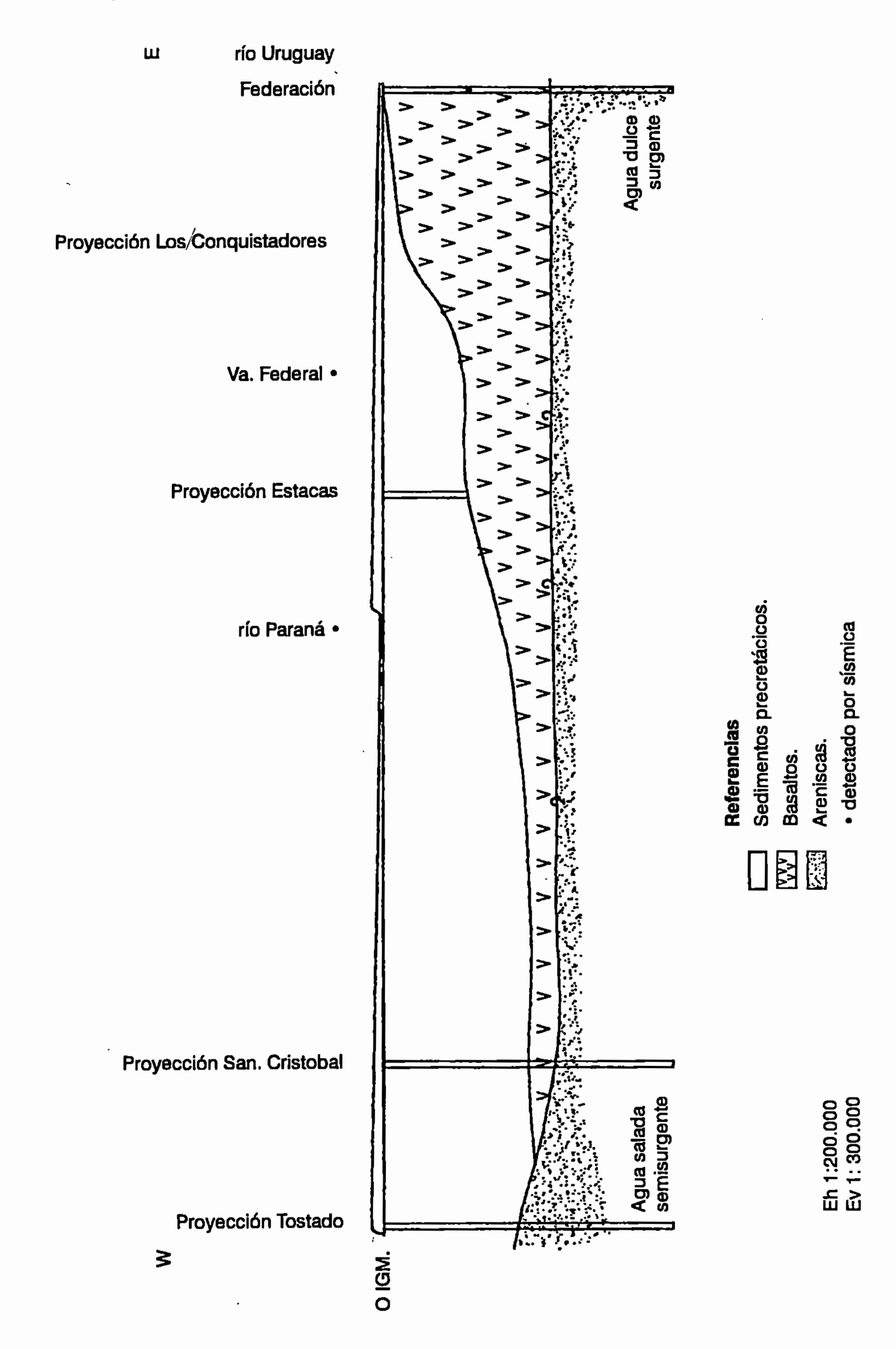
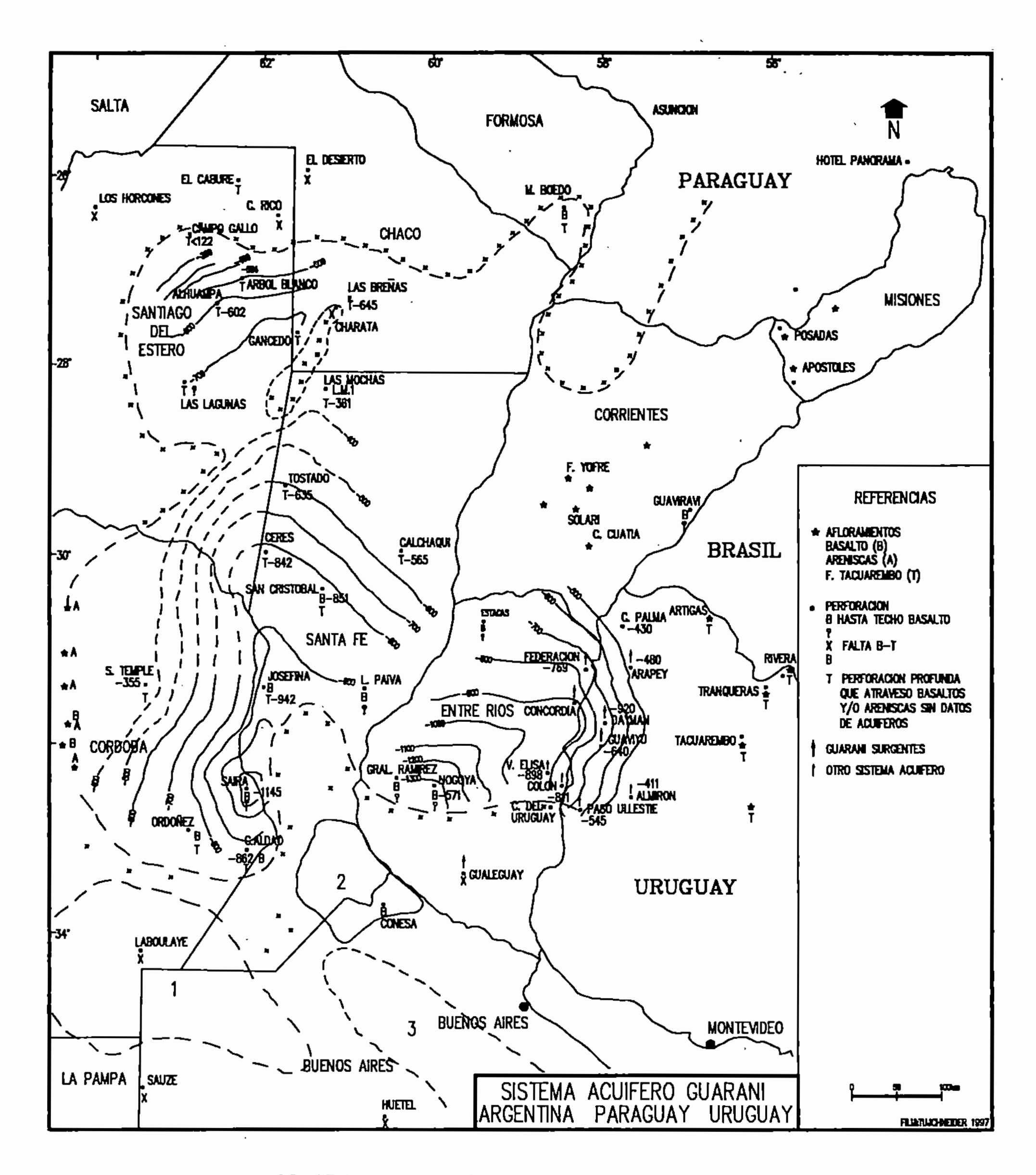


Figura 11. Mapa de isobatas del techo de las areniscas.
M. Fili, O. Tujchneider, 1997.



LIMITES DE CUENCAS–ISOBATAS TECHO DE ARENISCAS (ELABORACION PRELIMINAR)

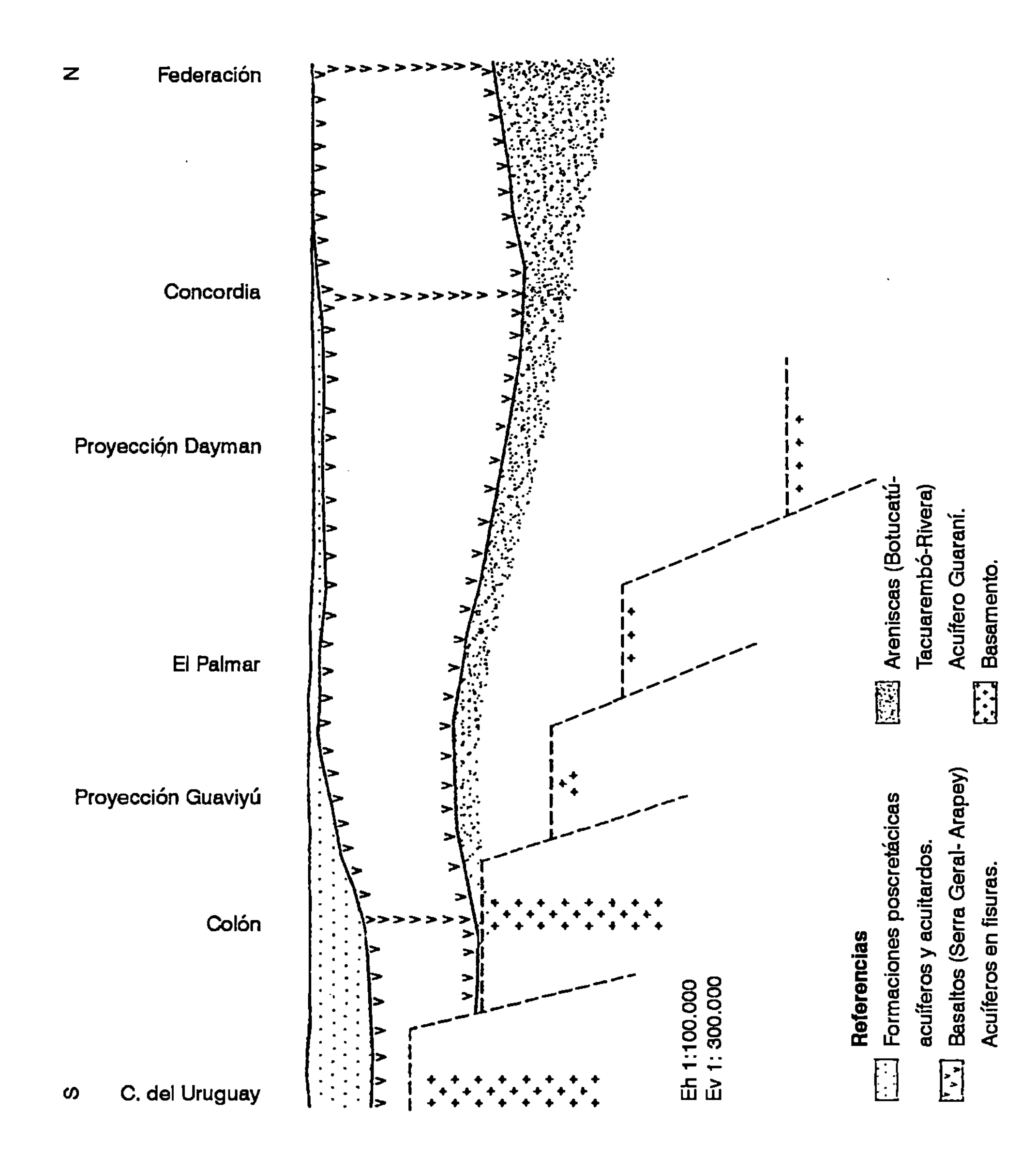
Referencias:

1) Cuenca de Laboulage
2) Cuenca de Rosario
3) Cuenca del Salado

+?+ Altos estructurales (adaptado de antecedentes*)
--- -500 --- Isobata

*)Zambrano (1974 – 1981); Padula (1972); Russo – Ferello – Chebli (1979); Lesta (1995); Yrigoyen (1975)

Figura 12. Perfil geológico-hidrogeológico esquemático, Norte-Sur. M. Fili, O. Tujchneider.



Aguas subterráneas

Consideraciones generales

A excepción de algunas perforaciones en la provincia de Misiones, con capas de areniscas acuíferas intercaladas en las coladas de basalto; de la capa acuífera surgente con 5 gramos de sales, perforada entre 495 y 499m en Gualeguay, en formaciones paleozoicas, y de algunas referencias sobre capas con agua salada a más de 900m de profundidad en San Cristóbal, no se contaba en Argentina con antecedentes sobre acuíferos infrabasálticos hasta que se llevaron a cabo las recientes perforaciones en Entre Ríos.

Llama la atención el caso particular que presenta la perforación Guaviraví Nro 1, en el sudeste de Corrientes, hasta hace pocos años la más profunda de la región; allí luego de atravesar basaltos hasta los 147m se entra en areniscas hasta los 713m. En el perfil no se informa sobre la presencia de acuíferos, pero cruzando el Río Uruguay, pocos kilómetros hacia el este en territorio de Brasil, las areniscas son productivas.

Federación, Concordia, Colón, Villa Elisa y Concepción del Uruguay, prácticamente alineadas de norte a sur sobre la ribera derecha del Río Uruguay, en un perfil de 200km, son los únicos elementos de juicio concretos que se disponen hasta el momento sobre la continuidad del Acuífero Guaraní en Argentina. Como se ha expuesto en el capítulo precedente, las areniscas se extienden hacia el oeste hasta las Sierras Pampeanas; si bien las posibilidades de hallar

capas productivas al oeste del Río Paraná se van reduciendo, aún no se cuenta con información suficiente como para descartar su continuidad más allá de ese límite.
Si el techo de las areniscas se mantiene a una cota constante cercana a los -800m, como se ha inferido en el perfil esquemático E-W (Figura 10), la significativa reducción en el espesor de los basaltos constituye una situación propicia para intentar el alumbramiento del acuífero en la ribera izquierda del Río Paraná, desde la ciudad de Paraná hacia el norte.
Hacia el sur las condiciones son menos favorables, como ocurre en la costa del Río Uruguay aguas abajo de Colón. En la parte sur de la provincia, la perforación más occidental fue realizada en El Pueblito (Nogoyá E.R.N.1 Y.P.F.). En esa perforación, por debajo de 800m de basaltos con intercalaciones psamo-psefíticas (Fernández Garrasino et al, 1995), siguen 400m de areniscas pero, como se ha señalado, no hay información sobre aguas subterráneas profundas.

Los acuíferos en areniscas aflorantes e intrabasálticas

En numerosas perforaciones de las provincias de Misiones y Corrientes se explotan acuíferos alojados en areniscas de edad cretácica. Frecuentemente se trata de capas de poco espesor e intercaladas entre coladas basálticas.
En Posadas, por debajo de basaltos, entre 335m y 470m fue hallado un acuífero en areniscas, con 265mg/l de sales y su nivel potenciométrico ascendió hasta 35m por debajo de la superficie. En Zaimán, por debajo de 280m de basaltos se detectó una capa de arenisca de solamente un metro, con agua de baja salinidad (168mg/l); su nivel piezométrico ascendió hasta 19m por debajo de la superficie. En Apóstoles, intercalada entre basaltos, entre 122 y 132m se encontraron areniscas rojizas blandas, con un total de sales de 183mg/l y un nivel piezométrico ascendente hasta 56m bajo de la boca de la perforación. A éstos se agrega la referencia ya hecha sobre San Ignacio.
También en Curuzú Cuatiá, Felipe Yofré y Solari (Corrientes) se hallaron areniscas acuíferas semisurgentes pero más próximas a la superficie.

Características del Acuífero Guaraní

Las cinco perforaciones realizadas en la Provincia de Entre Ríos (Figura 1) corroboran la continuidad, en territorio Argentino, de los lineamientos geológicos y consecuentemen-

te hidrogeológicos, que se observan en el perfil AB (Norte-Sur) del Capítulo Uruguayo.
Como se ha señalado precedentemente al reseñar las tareas desarrolladas, la información lograda sobre las nuevas captaciones surge en gran medida de datos proporcionados verbalmente. A excepción de la perforación realizada en Villa Elisa, cuyos resultados han sido publicados recientemente (Ainchil y Giusso, 1997), no se han podido obtener descripciones geológicas detalladas. En el epígrafe siguiente se exponen los datos más significativos.

Características de las perforaciones

En Federación se alcanzó una profundidad total de 1.350m y la cota de boca de la perforación es de aproximadamente 43m. Se perforó en basaltos hasta los 830m, profundidad a la que se entró en areniscas que continuaron hasta los 1.350m. Por las evidencias que se tienen del lado uruguayo, la formación debe ser bastante más potente. El acuífero es surgente, con un nivel potenciométrico de 100m y temperatura de 45ºC.
En Concordia, la perforación realizada en el paraje "El Espinillar" (intersección de las avenidas Monseñor Rosch y Aníbal Requena), llegó a la profundidad total de 1.170m. Desde boca de pozo hasta 70m hay sedimentos; a partir de esa profundidad y hasta los 970m se perforó en basaltos; a partir de allí se entró 200m en las areniscas. El caudal inicial de surgencia fue de 310m^3/h, el nivel ascendió hasta 60m, y el agua tenía una temperatura de 47ºC.
En Colón la perforación realizada al lado del río, a cota aproximada 19m, atravesó una columna sedimentaria de 249m antes de ingresar en los basaltos; entró en areniscas a los 762m. La perforación alcanzó la profundidad de 1.500m pero, si bien no se ha podido constatar, el espesor de areniscas no sobrepasaría los 50m. El acuífero es surgente, con un caudal de 120m^3/h, a una temperatura de 35ºC.
En Villa Elisa, la perforación, con cota de boca 42,5m, alcanzó la profundidad de 1.032m; hasta los 352m hay sedimentos; desde esa profundidad hasta los 940m basaltos; a partir de allí hasta el fondo de la perforación se describen en general "niveles permeables, arenosos, arcillosos, clásticos, roca ígnea alterada" (Ainchil y Giusso, op. cit.).
El agua es surgente, con poca presión; en el momento de entrarse en el acuífero se registraba una temperatura en boca de pozo de 34,5ºC. Por comunicación verbal se informó que luego de unos días subió hasta aproximadamente 40ºC.
En Concepción del Uruguay, de acuerdo a datos informa-

dos en boca de pozo cuando se estaba realizando la perforación y luego de su finalización, la columna geológica estaría constituida por sedimentos hasta la profundidad de 290m. De allí, hasta los 470m una secuencia de capas basálticas; a partir de allí y hasta los 1.218m, profundidad total, se habrían perforado rocas del basamento.
Los propietarios de la captación informan sobre los siguientes niveles acuíferos:

• Primer acuífero: a 30m, en sedimentos; nivel estático 8m por debajo de la superficie del terreno.

• Segundo acuífero: a 110m, en sedimentos; nivel estático 20m b.b.p. Ambas capas fueron aisladas.

• Tercer acuífero: a 365m en basaltos. No se informa nivel potenciométrico; se extrae por bombeo un caudal de entre 150 y 200m^3/h; agua salada con temperaturas del orden de los 25°C. El pozo está entubado hasta los 390m.

• Cuarto acuífero: a 475m en el contacto basaltos-basamento cristalino. Se le asigna una temperatura de 36°C; no hay datos de producción.

• Quinto acuífero: entre 830 y 1.060m en granitos, granodioritas y tonalitas. Se le asigna una temperatura de entre 42 y 47°C. No hay datos de producción.

Desde una capa productiva entre basaltos, a 365m de profundidad, con niveles productivos sin surgencia y temperaturas variables (24°C y 36°C), se extraerían, por bombeo, caudales del orden de los 150 a 200m^3/h.
Todos los datos consignados sobre esta perforación deben tomarse con reservas hasta que se disponga de informes avalados por los profesionales intervinientes.

Características hidroquímicas del acuífero

Con el objeto de caracterizar el comportamiento hidroquímico del sistema geohidrológico en estudio, se llevaron a cabo diferentes procedimientos metodológicos.
El análisis detallado de la información antecedente y su integración con los datos provenientes del muestreo realizado en el trabajo de campo, permitió identificar características hidroquímicas diferenciales.
Se analizó la evolución temporal de algunos contenidos iónicos y el posible origen del agua subterránea.

Información química disponible

Información antecedente

• Dos análisis químicos en *Federación* con determinaciones de: pH, conductividad eléctrica, residuo seco, dureza, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, sílice, nitratos, nitritos, amoníaco, arsénico, plomo, hierro, materia orgánica. *Fuente*: Secretaría de Obras Públicas de la Municipalidad de Federación.
• Tres análisis químicos de *Termas de Arapey* con determinaciones de: temperatura, pH, conductividad eléctrica, residuo seco, dureza, alcalinidad, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, sílice, dióxido de silicio, nitratos, nitritos, amoníaco, hierro. *Fuente:* Lic. Jorge Montaño.
• Dos análisis químicos de *Termas de Daymán* con determinaciones de: pH, conductividad eléctrica, residuo seco, dureza, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, dióxido de silicio, nitratos, nitritos, amoníaco, hierro, flúor, manganeso. *Fuente:* Lic. Jorge Montaño.
• Un análisis químico de *Paso Ullestie* con determinaciones de: conductividad eléctrica, residuo seco, dureza, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, nitratos, hierro, manganeso. *Fuente:* Lic. Jorge Montaño.
• Un análisis químico de *Almirón* con determinaciones de: pH, conductividad eléctrica, residuo seco, dureza, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, dióxido de silicio, nitratos, hierro y manganeso. *Fuente:* Lic. Jorge Montaño.

Muestreo realizado en el trabajo de campo

Se realizaron ocho tomas de muestras en los siguientes sitios: Federación, Villaguay, Villa Elisa y Colón, en la República Argentina; y Termas de: Arapey, Daymán, Almirón y Guaviyú, en la República Oriental del Uruguay.
A estas muestras se les realizaron determinaciones de: residuo seco, dureza, alcalinidad total, calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, carbonatos, sílice, nitratos, nitritos, arsénico, plomo, aluminio, flúor, bario, zinc, hierro, manganeso, litio, mercurio, cadmio, níquel, estroncio, molibdeno, cobre, cromo, que completan las de-

terminaciones realizadas en campaña de temperatura y pH. Además, se realizaron en el Instituto Nacional de Geología y Geocronología Isotópica (INGEIS) del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de la República Argentina (CONICET), determinaciones de: tritio, deuterio y oxígeno 18. Al momento de la edición del presente trabajo, las muestras para determinación de tritio que habían sido enviadas al INGEIS, fueron a su vez remitidas por esta Institución a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), ante problemas surgidos en las determinaciones por fallas de equipamiento.
Luego de realizado el trabajo de campo se obtuvo una muestra de agua de la perforación (en ejecución) de Concepción del Uruguay. Si bien esta perforación es profunda (aproximadamente 1.200m), está realizada fuera del límite de la cuenca y no pertenece al Sistema Acuífero Guaraní.

Elaboración de la información hidroquímica

Determinaciones preliminares

Mediante el empleo del Programa ANAQUIM (Usunoff y Morano, 1995), se realizó:
• la transformación de unidades de la información química disponible de mg/l a meq/l (Tablas 1 y 2, Anexo);
• el cálculo de valor medio y desvío standard para cada una de las series iónicas consideradas en el procesamiento (Tabla 1, Anexo);
• el cálculo del índice de cambio de base o desequilibrio cloro alcalino (Tabla 3, Anexo);
• el cálculo de las relaciones químicas de interés: K/Na, Na/Ca, Mg/Ca, SO_4/Cl y Cl/CO_3H (Tabla 3, Anexo).

Clasificaciones químicas

El empleo del software de las Naciones Unidas GWW (Ground Water for Windows, 1995) permitió obtener:
1) Ficha individual de cada análisis que presenta los contenidos de cationes y aniones, residuo seco, dureza, alcalinidad, conductividad, pH, relación adsorción sodio, sumatoria de cationes y aniones, error del balance iónico, diagrama de Stiff resultante y tipo de agua de acuerdo a esta clasificación (Tablas 4 a 26, Anexo).
2) Para cada sitio se obtuvieron los diagramas de Schöeller

y Piper-Hill correspondientes a las muestras respectivas (Figuras 1 a 8, Anexo).

Evolución temporal de algunos contenidos iónicos

En las Figuras 13 y 14 se presenta la evolución temporal de algunos contenidos iónicos de aquellos sitios en los que se poseen análisis de distintas fechas.

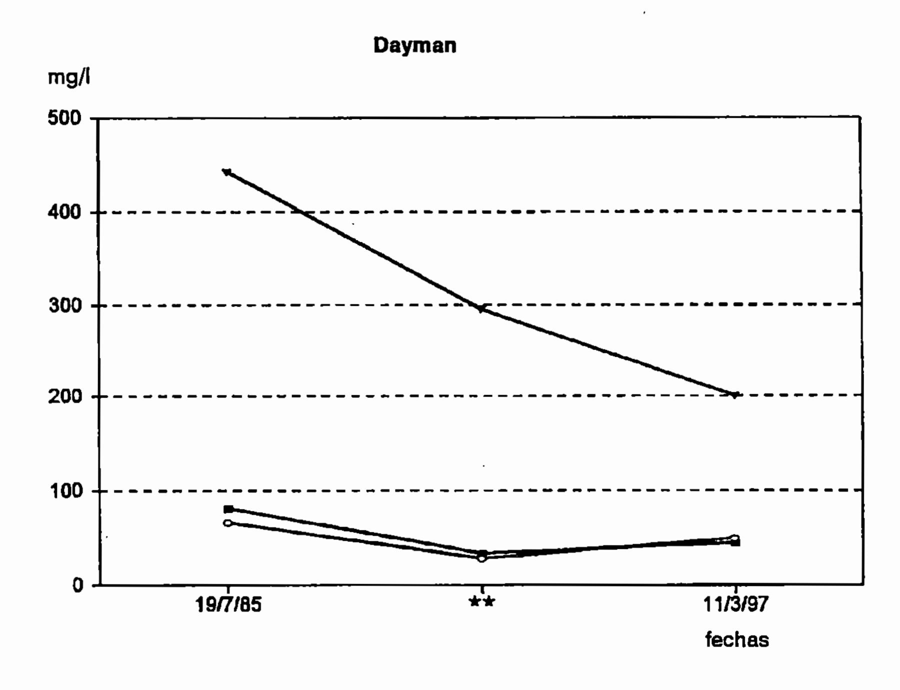
Isótopos ambientales

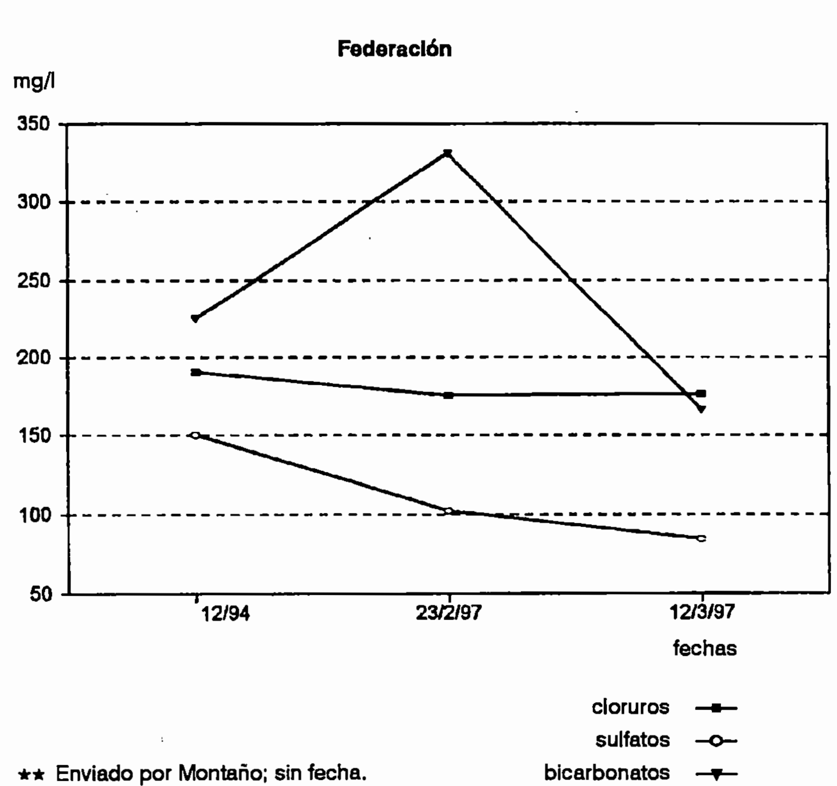
La Tabla 27 (Anexo) presenta los datos de los isótopos ambientales determinados: oxígeno 18, y deuterio. La Figura 15 muestra los valores ploteados de los contenidos de δD en función de los contenidos de $\delta^{18}O$ y su relación con las rectas meteóricas: mundial y local (ciudad de Buenos Aires).

Relaciones químicas e isotópicas

La Figura 16 muestra la relación entre los contenidos de residuo seco y las concentraciones de cloruro, en mg/l. La Figura 17 presenta la relación $\delta^{18}O$ versus concentraciones de cloruro en mg/l.

Figura 13. Distribución temporal de los contenidos iónicos.

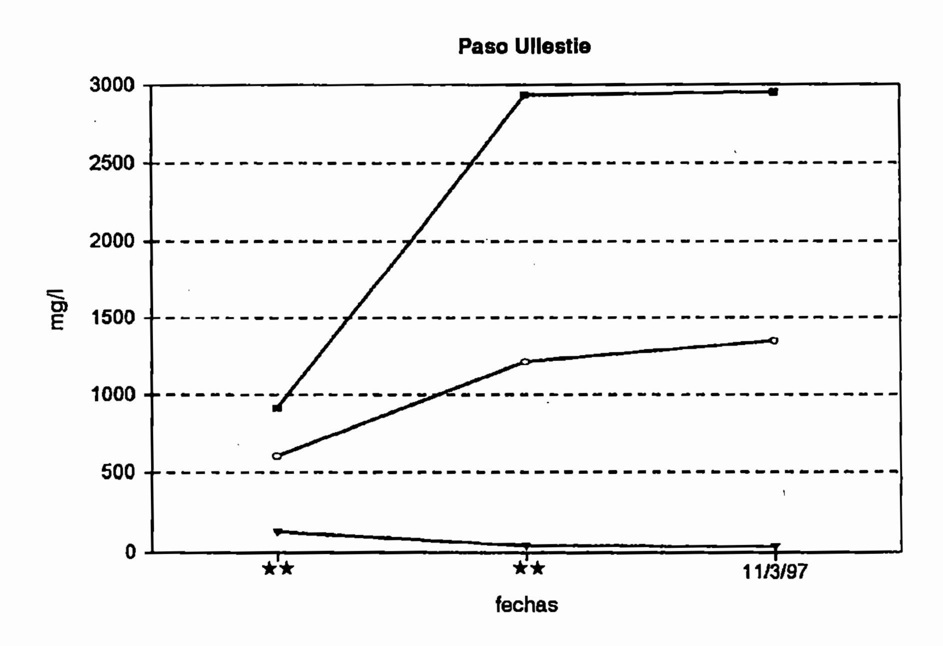


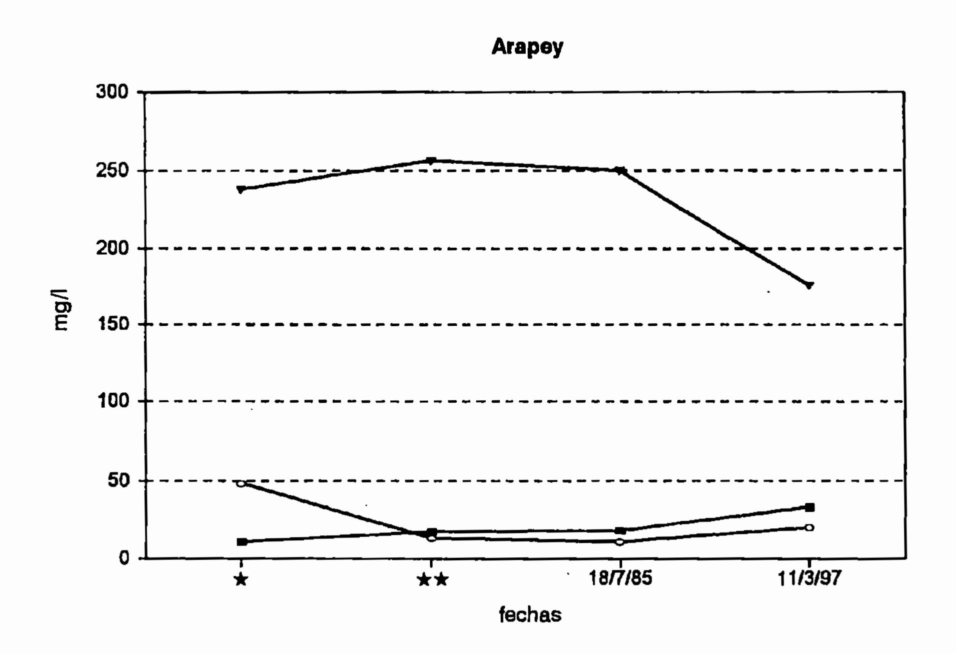


cloruros
sulfatos
bicarbonatos

** Enviado por Montaño; sin fecha.

Figura 14. Distribución temporal de los contenidos iónicos.





Referencias

cloruros
sulfatos
bicarbonatos

★★ Enviado por Montaño; sin fecha.

★ Tomado de etiqueta sin fecha.

Figura 15. Recta Meteórica.

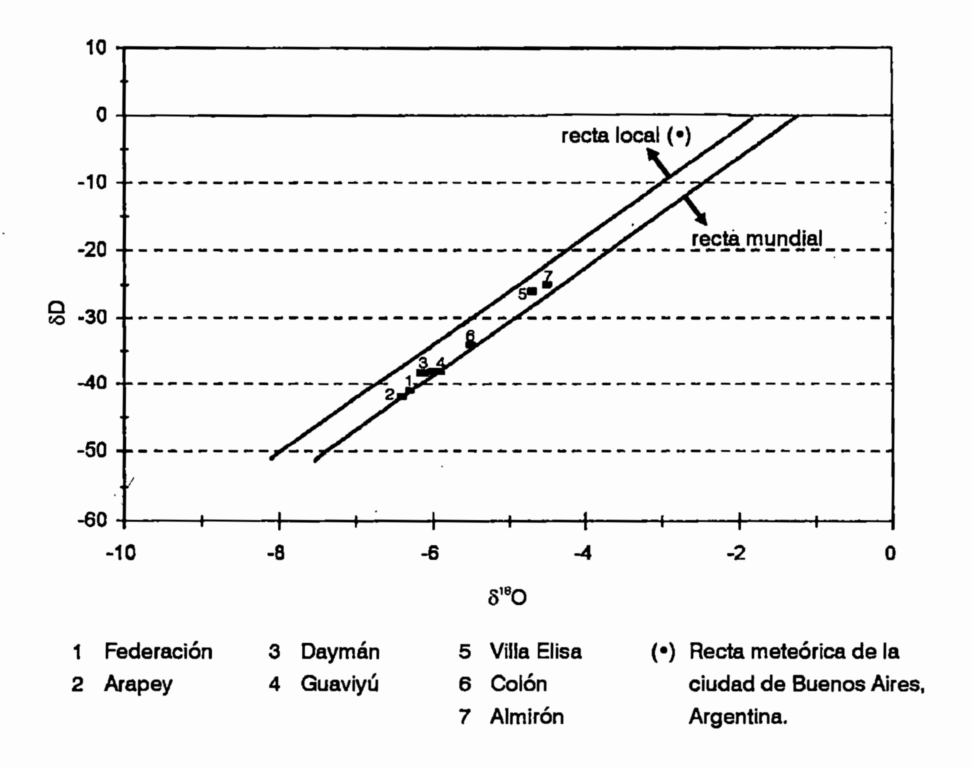


Figura 16. Relación residuo seco - cloruro.

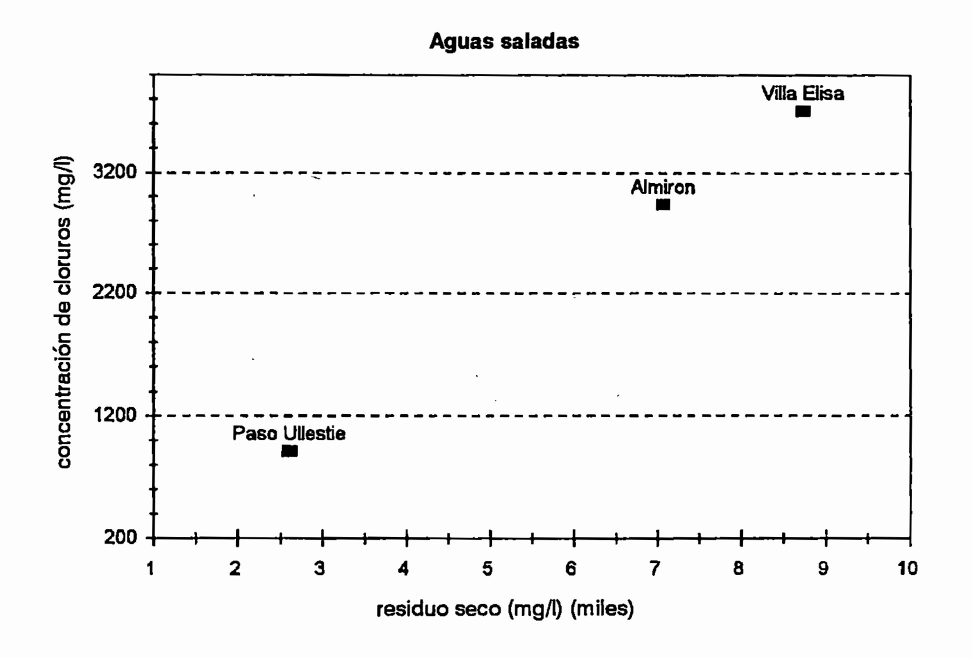
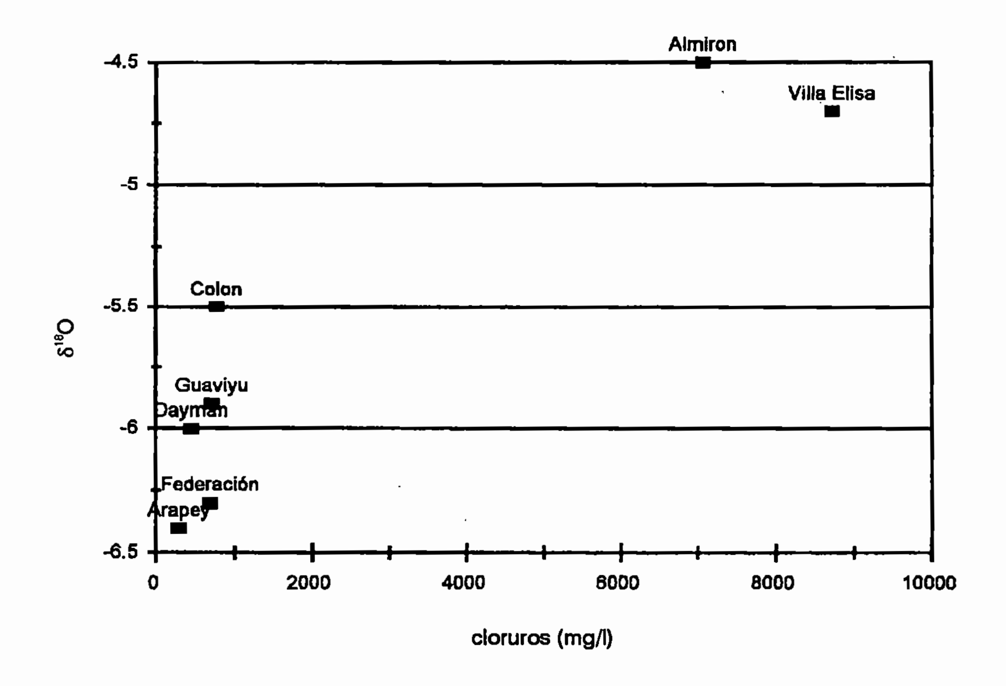


Figura 17. Relación $\delta^{18}O$ - Cloruro.



Análisis estadístico

Fueron consideradas para el análisis las siguientes variables: cota del techo de las arenas, temperatura, residuo seco, Ca, Mg, Na, Cl, SO_4, CO_3H, $\delta^{18}O$, y δD.

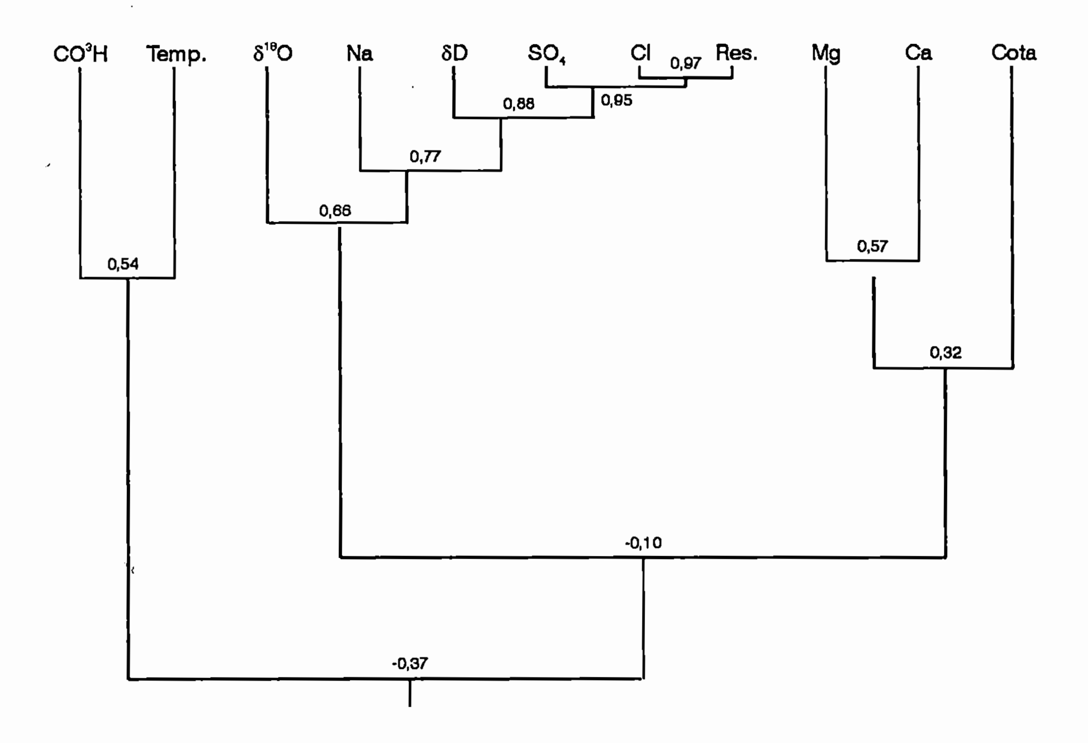
Análisis estadístico univariado

La Tabla 28 (Anexo) contiene los estadísticos descriptivos de las series iónicas principales.
Las Figuras 17 a 27 (Anexo) presentan el ajuste a la Ley de Distribución Normal.

Análisis estadístico multivariado

La Figura 18 presenta el dendrograma resultante de la aplicación del análisis de agrupamiento entre variables (Modo R).
La Figura 19 presenta el dendrograma resultante de la aplicación del análisis de agrupamiento entre las observaciones (Modo Q).

Figura 18. Dendograma. Análisis de agrupamiento entre variables (Modo R)

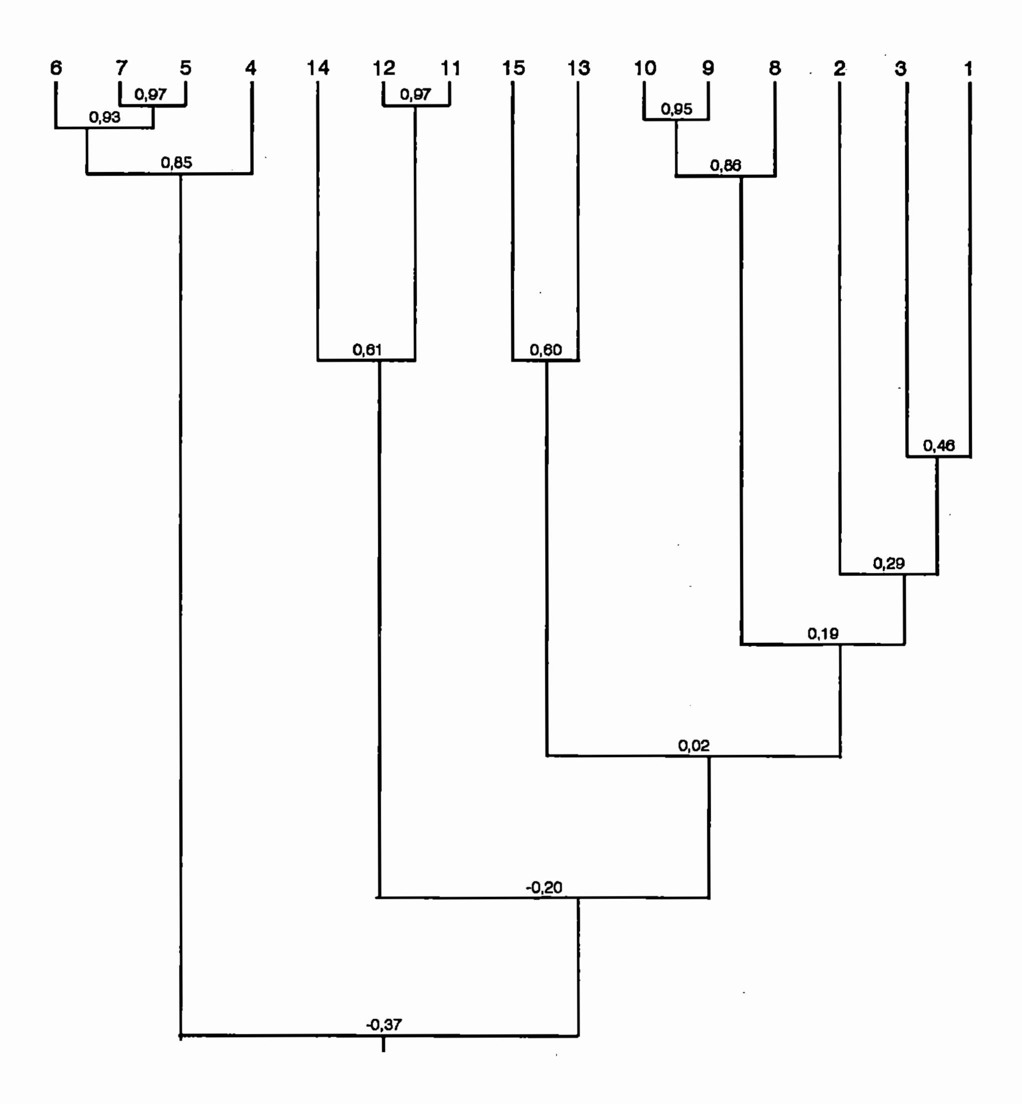


La Tabla 29 (Anexo) resume los resultados obtenidos de la aplicación del Análisis Factorial por Componentes Principales entre variables (Modo R). La Figura 20 representa gráficamente los factor loadings, en un plano ortogonal tridimensional, definido por los factores principales. La Tabla 30 (Anexo) resume los resultados obtenidos de la aplicación del Análisis Factorial por Componentes Principales entre observaciones (Modo Q). La Figura 21 contiene la representación ortogonal de los factor loadings obtenidos para el procesamiento entre observaciones.

Análisis de los resultados

De acuerdo a las concentraciones iónicas de los elementos principales y, según la clasificación propuesta por Piper, las muestras correspondientes a Gauviyú, Daymán, Colón y Federación pertenecen al tipo *bicarbonatadas sódicas;* las correspondientes a Almirón, Paso Ullestie y Villa Elisa son del tipo *cloruradas sódicas.*

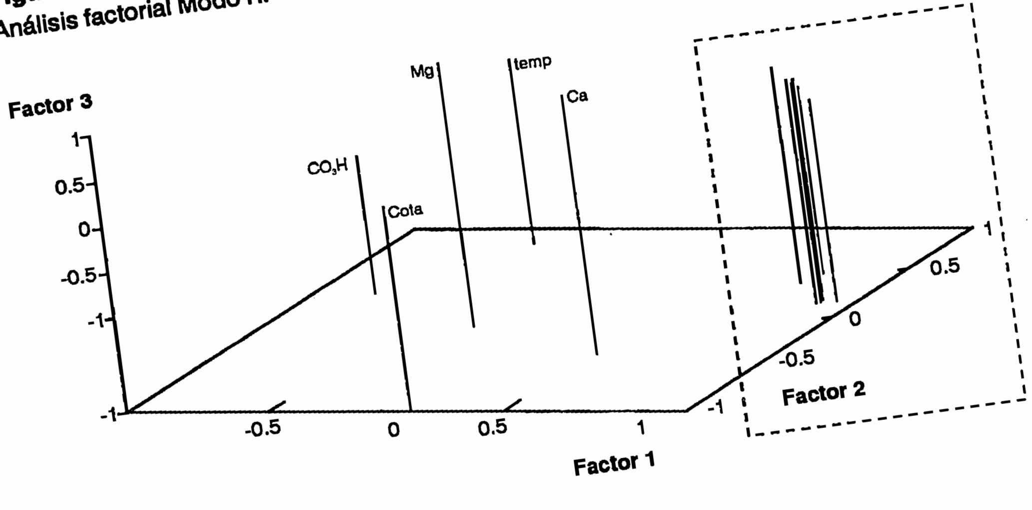
Figura 19. Dendrograma - Análisis de agrupamiento entre observaciones (Modo Q)



Referencias:

6, 7, 5, 4 Termas de Arapey
14 Villa Elisa
12, 11 Almirón - Paso Ulliestie
15 Colón
13 Guaviyú
10, 9, 8 Termas de Daymán
2, 3, 1 Termas de Federación

Figura 20. Factor loadings en plano ortogonal tridimensional. Análisis factorial Modo R.



(ampliación)

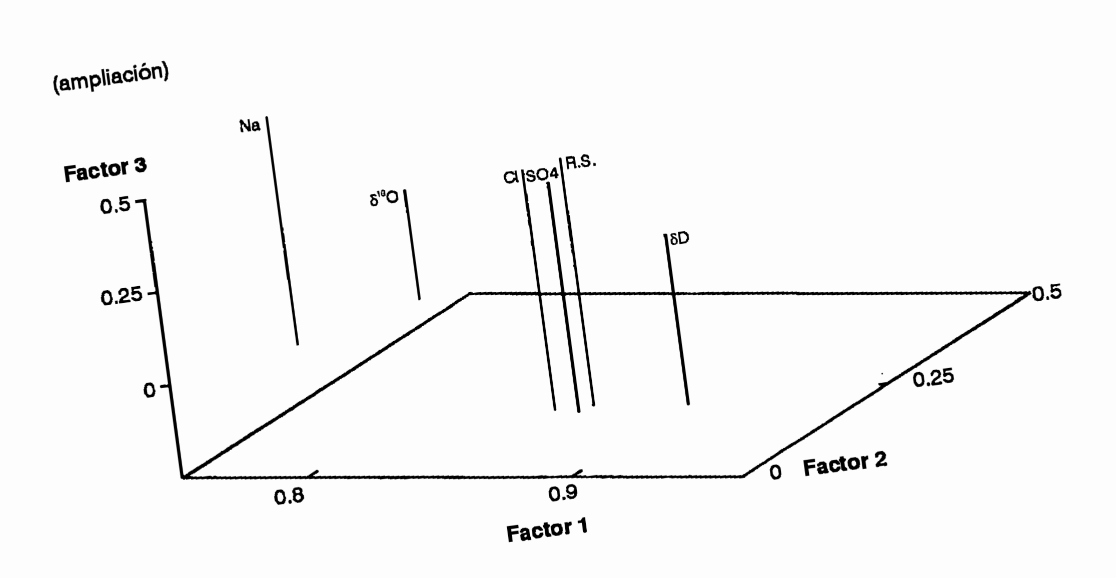
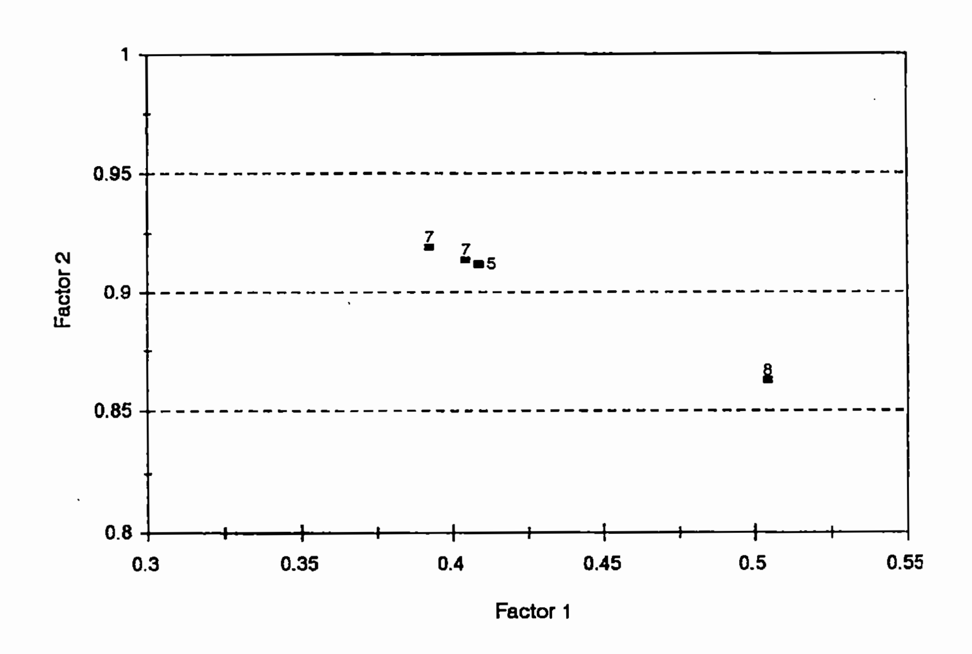
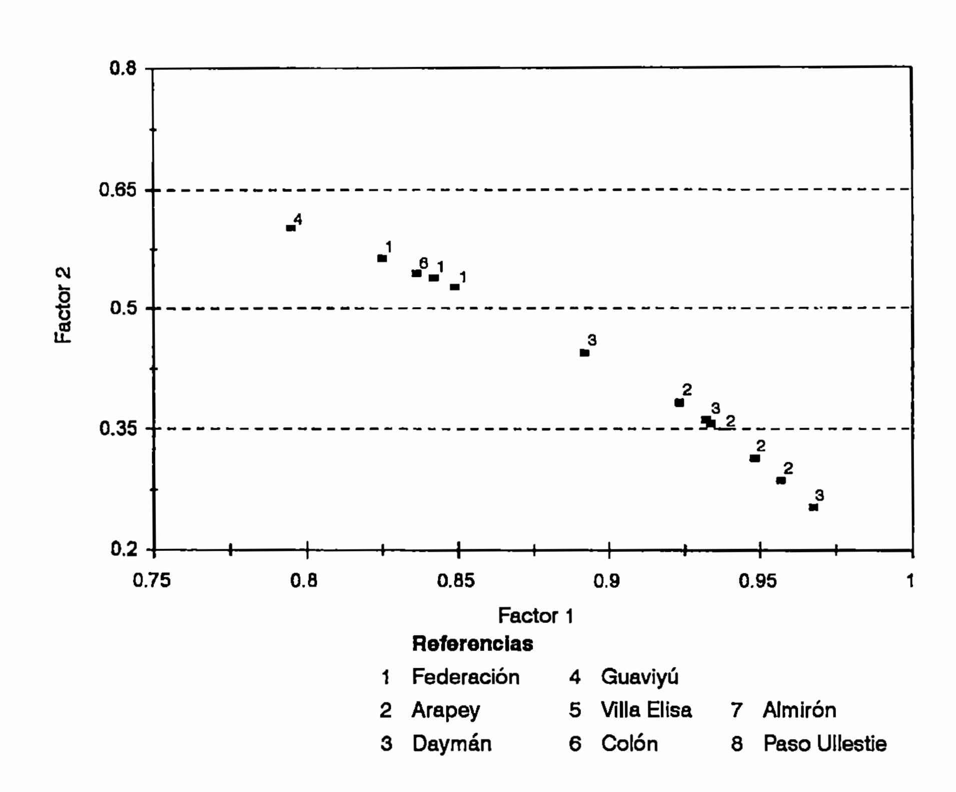


Figura 21. Factor loadings en plano ortogonal.
Análisis factorial por componentes principales (Modo Q)





Referencias

1	Federación	4	Guaviyú		
2	Arapey	5	Villa Elisa	7	Almirón
3	Daymán	6	Colón	8	Paso Ullestie

Del análisis de los diagramas de Schöeller se evidencian dos grandes subconjuntos con comportamientos bien diferenciados tanto en la rama aniónica (fundamentalmente en cloruros y sulfatos), como en la catiónica (principalmente en sodio). Figuras 22 y 23. Uno de estos subgrupos incluye las muestras de Villa Elisa, Paso Ullestie y Almirón.
En todos los casos el índice de cambio de bases es negativo. Esto indicaría que, en su recorrido por el medio poroso, el agua se habría enriquecido de sodio y potasio como consecuencia de fenómenos de intercambio iónico.
El análisis temporal de las series aniónicas, pone de manifiesto disminución de los contenidos de bicarbonato en contraposición al aumento de cloruro y sulfato.
La representación gráfica de los contenidos de isótopos ambientales $\delta^{18}O$ y δD y su relación con las rectas meteóricas local (Buenos Aires) y mundial, da como resultado una alineación paralela a las rectas de referencia. Este paralelismo está evidenciando el origen meteórico de las aguas.
Por otra parte, se observa que los valores más negativos de $\delta^{18}O$ se corresponden con las aguas dulces y las menores desviaciones de este isótopo se asocian con las muestras de salinidad elevada. De ello se deduce que estas últimas se habrían infiltrado bajo condiciones paleoclimáticas más cálidas que las primeras.
De acuerdo al ajuste a leyes de distribución, las series de cota del techo de las arenas, temperatura, bicarbonato, $\delta^{18}O$ y δD, responden a la ley Normal; mientras que el resto de las variables (residuo seco, calcio, magnesio, cloruro y sulfato) presentan una asimetría importante y un ajuste aceptable a la Log-Normal. Se debe tener presente que, según Smirnov (1969), en el ciclo geoquímico de las aguas, el desarrollo estadístico de la composición iónica del agua pasa de una distribución Log-Normal correspondiente al estado de equilibrio dinámico difusional, a una distribución normal, correspondiente al equilibrio químico.
En el análisis cluster entre variables, se advierte la siguiente estructura de vinculación: con un nivel de similitud de -0,37 se diferencian dos grupos; uno de ellos conformado por el núcleo CO_3H-temperatura; otro grupo formado por dos subgrupos claramente identificados: Mg-Ca y cota; y residuo seco-Cl, SO_4, Na, δD y $\delta^{18}O$.

Figura 22. Diagrama de Schöeller.

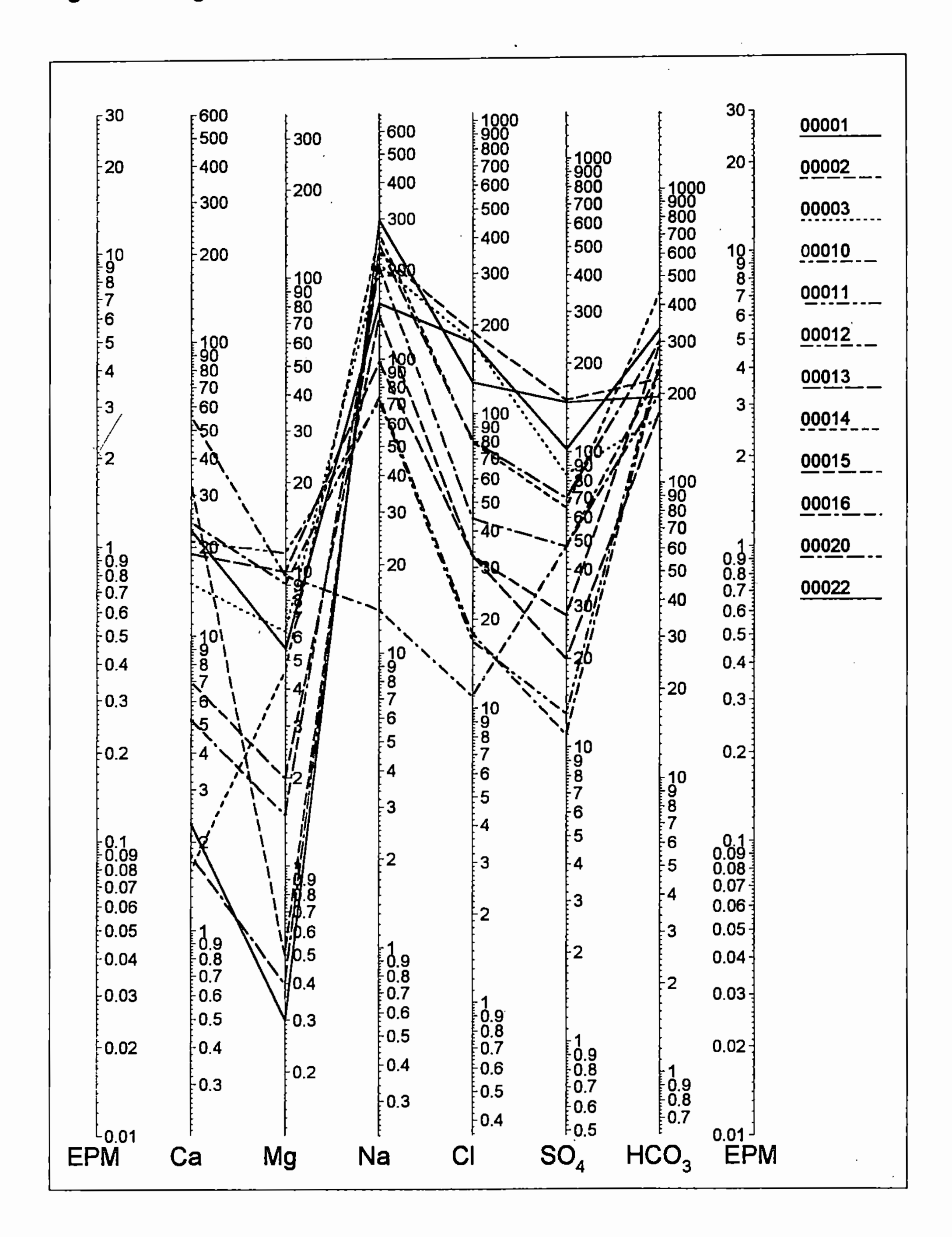
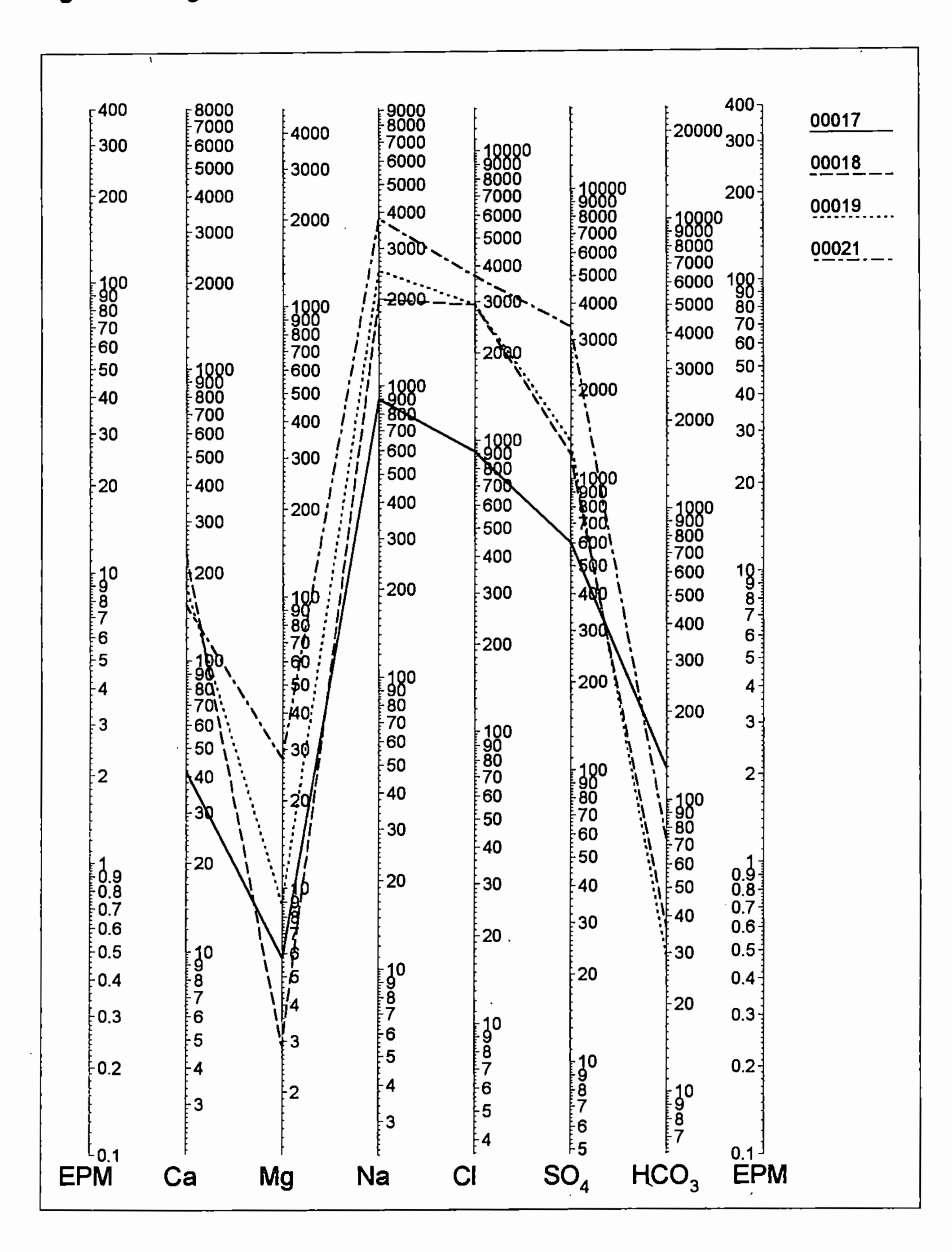


Figura 23. Diagrama de Schöeller.



El análisis cluster entre observaciones pone en evidencia dos grupos principales que se separan con un coeficiente de similitud muy bajo (-0,37). Uno de estos grupos comprende las muestras correspondientes a Arapey, y el otro está integrado a su vez por distintos subgrupos que se mencionan a continuación en orden jerárquico de agrupación: 1) Daymán, 2) Federación, 3) Colón-Guaviyú y 4) Almirón-Paso Ullestie y Villa Elisa. Los diferentes grados de vinculación expresados por los valores del coeficiente de similitud que se muestran en la Figura 19, indican además que este último subgrupo mantiene una conexión muy débil (-0,20) con el resto de los subgrupos.

En el análisis factorial, por componentes principales, planteado entre variables (Modo R), y reteniendo tres factores, se representa aproximadamente el 88% de la varianza total, y al menos un umbral del 75% de la comunalidad de las variables empleadas. Los factores obtenidos luego de la rotación Varimax son (Figura 20):

• Factor 1, representa el 56 % de la varianza total, está formado por: residuo seco, Na, Cl, SO_4, δD, $\delta^{18}O$ y CO_3H, este último con signo negativo.

• Factor 2, representa el 22 % de la varianza total y está formado por: temperatura y cota del techo de las arenas.

• Factor 3, representa el 10 % de la varianza total y está compuesto por Ca y Mg.

A través de la interpretación de los factor scores, se puede establecer la zona de mayor influencia de cada uno de los factores principales considerados, es decir:

• El Factor 1, registra influencia en el área de Villa Elisa, Almirón, Paso Ullestie y Colón.

• El Factor 2, en el área de Federación, Daymán y Guaviyú.

• El Factor 3, en el área de Arapey.

En el análisis factorial por componentes principales entre observaciones (Modo Q), se retuvieron dos factores que explican el 97,7 % de la varianza total:

• Factor 1, representa el 95,5 % de la varianza total.

• Factor 2, representa el 2,1 % de la varianza total.

La representación en un diagrama bidimensional de factor loadings (Figura 21) permite identificar dos agrupaciones:

• una de ellas formada por las observaciones de: Colón, Federación, Daymán, Guaviyú y Arapey;

• y la otra, por las observaciones de Villa Elisa, Almirón y Paso Ullestie.

Consideraciones finales

El estudio considerado en el marco de este Programa ha permitido reunir, analizar y elaborar una significativa cantidad de datos fundamentalmente geológicos, de indudable valor pero dispersos, e incorporar nueva información de índole hidrogeológica e hidroquímica. A partir de ahora se dispone de un marco general de referencia que permitirá, a través de nuevos aportes, ir accediendo a un conocimiento cada vez más detallado del Sistema Acuífero Guaraní.

La información geológica, tomada de la descripción de perfiles y analizada desde un enfoque hidrogeológico, pone de relieve la existencia de formaciones con aptitudes para constituir reservorios profundos de agua subterránea en casi toda la cuenca Chaco-paranense. También resulta de importancia, cuando se evalúan las posibilidades de acceder a ellos mediante perforaciones, conocer los espesores y distribución de las capas basálticas que en gran parte de la región cubren a las areniscas.

Resta, para una futura etapa de profundización de las investigaciones, realizar estudios sedimentológicos de mayor detalle, basados en la observación directa de los testigos de las perforaciones que han penetrado en las areniscas, así como del análisis de perfilaje de pozo correspondiente. Ellos permitirán acceder a un nivel de conocimientos de indudable valor científico y económico; además de proporcionar elementos de juicio sobre los parámetros hidráulicos de las

rocas con aptitudes de reservorio, aportarán datos sobre la posibilidad de existencia de agua y su grado de salinidad. Esta información es valiosa para determinar la extensión real del acuífero así como la factibilidad de aprovechamiento.
Las perforaciones realizadas en la Provincia de Entre Ríos, además de confirmar la continuidad del sistema acuífero al oeste del Río Uruguay, han puesto en evidencia que, como ocurre en el este, el medio geológico presenta un cierto grado de complejidad estructural, no siempre perceptible a través de estudios geofísicos. Si bien ahora ha disminuido a un mínimo el grado de incertidumbre de encontrar aguas infrabasálticas calientes sobre la rivera del Río Uruguay, desde Colón hacia el norte, aún el nivel de riesgo es importante para emprendimientos que se proyecten hacia el oeste.
Son altas las posibilidades de alumbrar acuíferos infrabasálticos en el este de las provincias de Corrientes y Misiones.
Hacia el sur, el límite de la cuenca pasa, en sentido este-oeste, entre Colón y Concepción del Uruguay. Las aguas que se extraen de la perforación realizada en esta última ciudad no provienen del Sistema Acuífero Guaraní.
Como ocurre en territorio de Uruguay, en Argentina es posible diferenciar dentro del sistema Guaraní, dos subsistemas: uno con agua de baja salinidad y mayores temperaturas, localizado en el sector central y norte y otro con agua salada y temperaturas menores, localizado en proximidades del borde sur de la cuenca. Fue detectado por la perforación de Villa Elisa, con aguas de características semejantes a las de Paso Ullestie y Termas de Almirón en Uruguay.
Es de fundamental importancia profundizar en el estudio geológico e hidrogeológico de las relaciones espaciales entre los dos subsistemas por las consecuencias que pueden derivar de una explotación más generalizada de las aguas alojadas en las areniscas infrabasálticas.
La hidroquímica y la hidrología isotópica han resultado de particular utilidad para analizar el funcionamiento del sistema. El análisis de los resultados obtenidos a través de la utilización de diferentes procedimientos metodológicos aplicados a esa información, permite señalar lo siguiente:
• de acuerdo a las concentraciones absolutas de los iones mayoritarios las aguas contenidas en las areniscas se dividen en dos grandes grupos, dulces y saladas; las primeras son de tipo bicarbonatado cálcicas y bicarbonatado sódicas; las saladas son clorurado sódicas;

• los dos grupos también se identifican mediante la relación deuterio-oxígeno 18 y la relación entre delta oxígeno 18 y residuo seco;
• el procesamiento estadístico multivariado, que permite efectuar una evaluación integrada de la información química, física, hidrogeológica e isotópica, mediante la aplicación del análisis de agrupamiento y el análisis factorial por componentes principales, reafirma lo señalado precedentemente;
• por la composición isotópica puede inferirse que se trata de aguas de origen meteórico que ingresaron al acuífero bajo el imperio de condiciones climáticas diferenciales;
• las relaciones isotópicas, referidas a las rectas meteóricas mundial y local (Buenos Aires) no presentan evidencias de fenómenos termales *sensu stricto.*

Una consideración especial merece el análisis temporal de la hidroquímica. Se observa, en la generalidad de los casos, un proceso de cambio en la constitución química del agua y particularmente su evolución hacia un mayor contenido de cloruros y sulfatos sobre bicarbonatos.

Si bien los elementos de jucio evaluados en el aspecto hidroquímico son relativamente escasos como para poder efectuar un diagnóstico sobre cambios en la calidad del recurso, y no se descarta que ciertas diferencias puedan atribuirse a distintos procedimientos analíticos, las observaciones señaladas alertan sobre la necesidad de monitorear sistemáticamente la evolución temporal y espacial de la calidad de las aguas.

Bibliografía

Agua y Energía, S.E. 1987. *Estudios Geofísicos Aguas Subterráneas Profundas. Convenio Gerencia Proyecto Paraná Medio AyEE-* Dirección de Minería Provincia de Entre Ríos. Informe Inédito.

Ainchil, Jerónimo y E. Marcelo Giussio. 1997. *Perforación Hidrotermal Profunda en Villa Elisa (E.R.). El ajuste de la factibilidad geoeléctrica y los criterios interpretativos.* I Congreso Nacional de Hidrogeología. pp. 97 a 103. Bahía Blanca, Argentina.

Alburquerque Rocha, G. 1996. *Mega Reservatorio de Agua Subterránea do Cone Sul: Bases para uma Política de Desenvolvimiento e Gestao. Contribucao ao Seminario Internacional "Aquifero Gigante do Mercosul"* 23/24 de maio de 1996. Univ. Nal. do Paraná, Curitiba.

Alvarez, L. A.; C. A. Fernández Garrasino; F. Fernández Seveso y M. A. Pérez. 1990. *El borde occidental de la cuenca Chacoparanense Argentina.* XI Congreso Geológico Argentino, Actas II, 141-144. San Juan.

Araujo, L. M., A. B. Franca y P. E. Potter. 1995. *Acuífero Gigante del Mercosur (Brasil, Argentina, Uruguay y Paraguay): Mapas Hidrogeológicos de las Formaciones Botucatú, Pirambóia, Rosario do Sul, Buena Vista, Misiones y Tacuarembó.* PETROBRAS UFPR.

Bigarella, J. J. y R. Salamuni. 1967. *A Review of South American Gondwana Geology.* UNESCO. Symp. on Continental Drift Emphasizing the History of the South Atlantic Area. Montevideo. Uruguay 16-19 October 1967.

Fernández Garrasino, C. A. 1995. *El "Paleodesierto de Botucatú - Solari" (Jurásico-Eocretácico de América del Sur). Significado Geológico y Paleoclimático.* Boletín de Informaciones Petroleras. Tercera Epoca. Año XI. N° 43: 89-119, Buenos Aires.

Gentili, C. A. y H. V. Rimoldi. 1979. Mesopotamia. En *Geología Regional Argentina.* Vol. 1:185-223. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.

Geoconsult, S. A. 1994. *Prospección hidrogeológica por métodos geoeléctricos con fines hidrotermales en la ciudad de Concordia, Pcia. de Entre Ríos.* Municipalidad de Concordia.

Gordillo, E. y A. N. Lencinas. 1979. *Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis.* Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Acad. Nac. de Ciencias. Vol I: 577-650. Córdoba.

Hausman, A. 1962. *Aspectos hidrogeologicos das areas basalticas.* Ias. Jorn. Geol. Arg., An., II: 103-136, Buenos Aires.

Heinzen, W. y col. 1986. *Elementos del Ciclo Hidrológico.* Carta hidrogeológica a escala 1:2.000.000. Dirección Nacional de Minería y Geología. División Aguas Subterráneas. Ministerio de Industria y Energía. R.O. Uruguay.

Herbst, R. 1971. *Esquema estratigráfico de la Provincia de Corrientes, República Argentina.* Rev. Asoc. Geol. Arg., 26 (2): 221-243.

Herbst, R., J. N. Santa Cruz y L. L. Zabert. 1976. *Avances en el conocimiento de la estratigrafía de la Mesopotamia Argentina, con especial referencia a la provincia de Corrientes.* Asoc. Cs. Nat. del Litoral, Rev., 7: 101-121, Santa Fe.

Herbst, R. y J. N. Santa Cruz. 1985. *Mapa Litoestratigráfico de la Provincia de Corrientes.* D'ORBIGNYANA N° 2. UNNE, Corrientes.

Herbst, R. y L. L. Zabert. 1990. *Sedimentos Triásicos en el Subsuelo de la Mesopotamia Argentina.* XI Congreso Geológico Argentino, Actas II, 97-100. San Juan.

Jalfin, G. A. 1987. *Litofacies y Paleocorrientes de la Formación Solari, Provincia de Corrientes.* Asoc. Geol. Arg. Rev., XLII (1-2):101-111. Buenos Aires.

Lesta, P. 1995. *El marco geológico argentino en la exploración de hidrocarburos, con especial referencia al gas.* Quincuagésimo Aniversario de la A.G.A. Mesa Redonda. Rev AGA, Tomo 50 n°1-4: 6 - 10.

Mackinnon, J. L. 1967. *Informe sobre estratigrafía del Gondwana en la región noroeste del Uruguay.* Gondwana stratigraphy, IUGS Symposium, Buenos Aires: 973-983, 2 figs. UNESCO, Paris (1969).

Mamani, M., J. Venencia, y A. Maidana. 1992. *Informe final sobre mediciones geofísicas.* San José, Pcia de Entre Ríos. Unidad Ejecutora Depto. Geofísica. IIACE - CRICYT - Mendoza.

Mingramm, A., A. Russo, A. Pozzo y G. Chebli. 1979. *Sierras Subandinas.* en Segundo Simposio de Geología Regional Argentina Acad. Nac. de Ciencias. Vol I: 95-138. Córdoba.

Montaño, J., R. Carrión. 1990. *Optimización de la Explotación del Sistema Acuífero Jurásico Triásico, Tacuarembó - Buena Vista.* Anais 6° Congreso Brasileiro de Aguas Subterráneas. ABAS, Trabajo N° 44: 180-189. Porto Alegre.

Montaño, J. y M. Pessi. 1992. *Características Hidráulicas e Hidrogeoquímicas del Acuífero Tacuarembó - Area Rivera.* Revista A.B.A.S., Marzo.

O.E.A. 1969. *Cuenca del Río de La Plata. Estudio para su Planificación y Desarrollo.* (Mapas geológico e hidrogeológico a escala 1: 3.000.000). Washington.

Padula, E. L. 1972. Subsuelo de la Mesopotamia y Regiones Adyacentes. En *Geología Regional Argentina:* 213-235. Academia Nacional de Ciencias, Armando Leanza, Ed. Córdoba.

Piovano, E. L. 1996. *Correlación de la Formación Saldán (Cretácico temprano) con otras secuencias de las Sierras Pampeanas y de las cuencas Chacoparanense y de Paraná.* Revista de la Asociación Geológica Argentina, 51 (1): 29-36.

Preciozzi F., J. Spoturno y W. Heinzen. 1979. *Carta Geo-Estructural del Uruguay.* Escala 1:2.000.000. Instituto Geológico "Ing. Eduardo Terra Arocena". Ministerio de Industria y Energía. Uruguay.

Preciozzi F., J. Spoturno, W. Heinzen y P. Rossi. 1985. *Memoria explicativa de la carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000.* Dirección Nacional de Minería y Geología. Uruguay.

Riccardi, A. C. y S. E. Damborenea. 1993. *Léxico estratigráfico de la Argentina.* Vol: IX JURASICO. Asoc. Geol. Arg. Serie B (Didáctica y Complementaria) N° 21. Buenos Aires.

Russo, A., R. Ferello y G. Chebli. 1979. Llanura Chaco Pampeana. En *Geología Regional Argentina.* Vol. 1:139-184. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.

Sanguinetti, J. A., E. L. Díaz, y O. Dalla Costa. 1993. *Informe de la exploración geoeléctrica y análisis geológico.* Municipalidad de Villa Elisa (ER), Proyecto Aguas Profundas. Informe Inédito.

Smirnov, S.I. 1969. *Statistical distribution of the concentrations of elements in natural waters.* Geochemistry. Nro. 4. pág. 437 a 444.

Soares, P. C. 1981. *Estratigrafía das Formaçoes Jurássico-Cretáceas na Bacia do Paraná - Brasil.* Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico: Cuencas sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur, Vol. 1: 271-304, Buenos Aires.

Spechmann, P., J. Bossi y J. Da Silva. 1981. *Cuencas del Jurásico y Cretácico del Uruguay.* Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico: Cuencas sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur, Vol. 1: 239-270, Buenos Aires.

Stappenbeck, R. 1926. *Geoligie und Grundwaserkunde der Pampa.* Stuttgart, Alemania. (Traducción).

Tujchneider, O. C. y M. F. Filí. 1988. *Hidrogeología de la cuenca del arroyo Feliciano, provincia de Entre Ríos.* Asoc. Geol. Arg., Rev. XLIII (2):163-174.

Usunoff, E. y M. Morano. 1995. *Control de calidad y procesamiento primario de datos químicos en Hidrología.* Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. CIC.

Zambrano, J. J. 1981. *Distribución y Evolución de las Cuencas Sedimentarias en el Continente Sudamericano durante el Jurásico y el Cretácico.* Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico: Cuencas sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur, Vol. 1: 9-44, Buenos Aires.

Agradecimientos

Los autores desean manifestar su reconocimiento por el valioso apoyo recibido de:

Dr. Danilo ANTON, ex-Director del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá. C.I.I.D.

Dr. Carlos SERE, Director del Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo de Canadá. C.I.I.D.

Lic. Jorge MONTAÑO, Coordinador del Proyecto en los Capítulos Argentino y Uruguayo.

Arq. Hugo STORERO, Rector de la Universidad Nacional del Litoral.

Ing. Mario D. BARLETTA, Secretario General de la Universidad Nacional del Litoral.

Ing. Julio C. THEILER, Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral.

Secretarios de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas: Ing. Marta PUJOL (Secretaria Académica); Ing. Cristóbal LOZECO (Secretario de Extensión); Sr. Horacio SUPPO (Secretario Técnico); Ing. Mario SCHREIDER (Secretario de Ciencia y Técnica).

Ángela LEONI, Directora de Asuntos Económicos de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas.

Dr. Daniel LANUSSOL y Dr. Héctor DI BENEDETTO, Personal Directivo de YPF S.A.

Eduardo GAVIU, Presidente de Termas de Concepción del Uruguay S.A.

Carlos MONDOLO, Presidente del Concejo Deliberante de Concordia.

Eduardo Félix DEL REAL, Intendente de la Municipalidad de Colón; Ing. PAIRONE, Director de Obras de Públicas.

Dr. Carlos VELA, Intendente de la Municipalidad de Villaguay; Agr. Víctor Hugo LARREA, Director de Obras Públicas.

César VILLALON, Intendente de la Municipalidad de Villa Elisa; Jerónimo AINCHIL, Geólogo a cargo de la perforación.

Ing. Hugo Roberto TOLLER, Secretario de Obras Públicas de la Municipalidad de Federación; Agustín GIBERT, Encargado de Termas; Sergio BURNA y Ariel VAGO, Personal Técnico.

María Luisa FLORES, Encargada de las Termas de Guaviyú.

Personal encargado de la Termas de Daymán, Almirón y Arapey.

Dr. Eduardo Luis DIAZ, Prof. de la Universidad Nacional de Entre Ríos.

Anexo

Tabla 1. Concentraciones iónicas originales (mg/l).

Localidad	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO_3	SO_4	CO_3	CO_3H	F	C. Eléct	R. Seco
Federación	22.80	5.50	154.03	0.00	175.00	0.50	102.00	S/D	331.00	S/D	1044.00	670.00
Federación	33.20	0.46	230.00	12.00	190.00	2.50	150.00	S/D	225.00	0.50	952.00	680.00
Federación	15.00	6.30	210.00	6.40	176.00	0.10	84.00	29.00	166.00	0.00	978.00	699.00
Villaguay	76.15	10.94	167.83	7.82	67.37	28.80	S/D	S/D	616.30	0.82	870.00	S/D
Villaguay	84.17	12.16	154.03	7.82	67.37	29.70	S/D	S/D	604.10	S/D	900.00	S/D
Villaguay	46.09	6.08	75.87	3.91	39.01	S/D	S/D	S/D	360.02	S/D	440.00	S/D
Villaguay	58.12	7.30	108.05	3.52	39.01	31.00	S/D	S/D	433.24	0.72	560.00	S/D
Villaguay	40.08	6.08	59.77	2.35	23.05	1.30	S/D	S/D	335.61	S/D	390.00	S/D
Villaguay	50.00	11.00	190.00	6.00	57.00	50.00	35.00	59.00	336.00	0.45	1021.00	729.00
Villaguay	56.00	9.70	14.00	7.80	10.60	7.00	48.00	S/D	238.00	0.60	380.00	220.00
Arapey	21.00	11.60	72.00	5.00	17.10	0.00	13.10	0.00	256.20	S/D	440.00	288.00
Arapey	24.40	9.10	74.00	6.00	18.00	12.50	10.70	S/D	250.00	S/D	358.00	256.00
Arapey	19.00	10.00	98.00	6.30	33.00	0.10	20.00	49.00	175.00	0.20	416.00	297.00
Daymán	1.60	4.56	268.00	0.92	80.36	3.80	65.10	S/D	442.00	1.60	975.00	696.40
Daymán	7.00	2.00	140.00	2.00	32.60	0.00	27.70	0.00	295.24	0.00	806.00	S/D

Tabla 1. (Continuación).

Localidad	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO_3	SO_4	CO_3	CO_3H	F	C. Eléct	R. Seco
Daymán	5.20	1.50	205.00	3.70	44.00	0.10	48.50	58.00	200.00	0.60	637.00	455.00
P. Ullestie	41.50	5.80	900.00	10.00	912.00	0.00	602.00	0.00	129.32	S/D	3000.00	2605.00
Almirón	233.00	2.90	2000.00	15.00	2935.00	0.00	1215.00	0.00	37.10	S/D	8000.00	6344.00
Almirón	180.00	8.90	2517.00	9.80	2950.00	0.10	1347.00	S/D	29.00	0.50	9902.00	7073.00
Guaviyú	1.80	0.40	245.00	1.70	81.00	0.10	70.00	88.00	302.00	1.00	997.00	712.00
Villa Elisa	155.00	28.00	3809.00	20.00	3705.00	0.10	3340.00	1.00	73.00	0.00	12222.00	8730.00
Colón	2.30	0.31	298.00	1.50	128.00	0.10	148.00	107.00	195.00	2.40	1084.00	774.00
Media	53.34	7.30	544.98	6.34	535.48	7.99	430.95	35.55	274.05	0.67	2107.82	1951.78
Desvío	59.85	5.87	945.13	4.76	1081.10	13.90	830.66	37.40	152.92	0.64	3259.38	2696.48

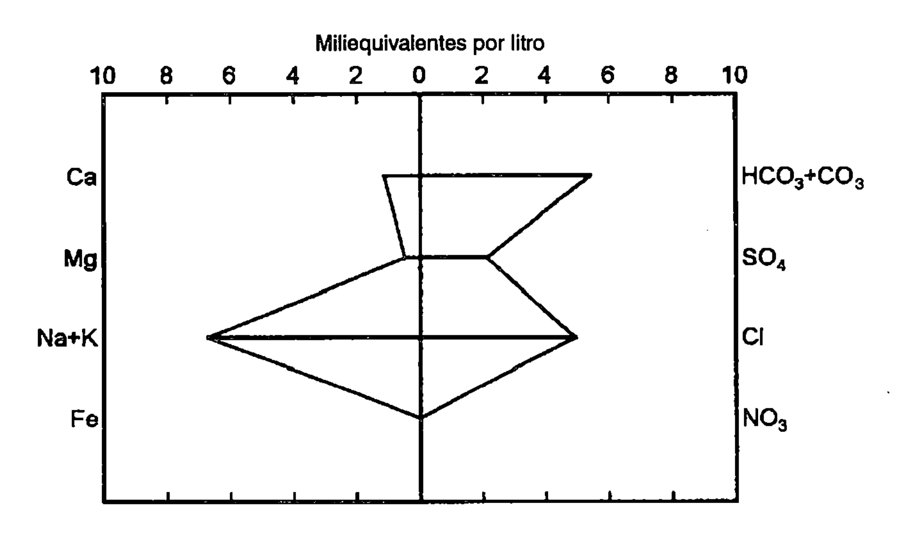
Tabla 2. Concentraciones iónicas (meq/l).

Localidad	Ca	Mg	Na	K	Cl	NO_3	SO_4	CO_3	CO_3H	F
Federación	1.14	0.45	6.70	0.00	4.94	0.01	2.12	0.00	5.43	0.00
Federación	1.66	0.04	10.01	0.31	5.36	0.04	3.12	0.00	3.69	0.03
Federación	0.75	0.52	9.14	0.16	4.96	0.00	1.75	0.97	2.72	0.00
Villaguay	3.81	0.90	7.30	0.20	1.90	0.46	0.00	0.00	10.11	0.04
Villaguay	4.21	1.00	6.70	0.20	1.90	0.48	0.00	0.00	9.91	0.00
Villaguay	2.30	0.50	3.30	0.10	1.10	0.00	0.00	0.00	5.90	0.00
Villaguay	2.91	0.60	4.70	0.09	1.10	0.50	0.00	0.00	7.11	0.04
Villaguay	2.00	0.50	2.60	0.06	0.65	0.02	0.00	0.00	5.50	0.00
Villaguay	2.50	0.91	8.27	0.15	1.61	0.81	0.73	1.96	5.51	0.02
Villaguay	2.80	0.80	0.61	0.20	0.30	0.11	1.00	0.00	3.90	0.03
Arapey	1.05	0.96	3.13	0.13	0.48	0.00	0.27	0.00	4.20	0.00
Arapey	1.22	0.75	3.22	0.15	0.51	0.20	0.22	0.00	4.10	0.00
Arapey	0.95	0.83	4.26	0.16	0.93	0.00	0.42	1.63	2.87	0.01
Daymán	0.08	0.38	11.66	0.02	2.27	0.06	1.35	0.00	7.25	0.08
Daymán	0.35	0.17	6.09	0.05	0.92	0.00	0.58	0.00	4.84	0.00
Daymán	0.26	0.12	8.92	0.09	1.24	0.00	1.01	1.93	3.28	0.03
P. Ullestie	2.08	0.48	39.15	0.26	25.72	0.00	12.52	0.00	2.12	0.00
Almirón	11.65	0.24	87.00	0.38	82.77	0.00	25.27	0.00	0.61	0.00
Almirón	9.00	0.74	0.49	0.25	83.19	0.00	28.02	0.00	0.48	0.03
Guaviyú	0.09	0.03	10.66	0.04	2.28	0.00	1.46	2.93	4.95	0.05
Villa Elisa	7.75	2.31	0.69	0.51	0.48	0.00	69.47	0.03	1.20	0.00
Colón	0.12	0.03	12.96	0.04	3.61	0.00	3.08	3.56	3.20	0.13

Tabla 3. Indices hidroquímicos y relaciones de interés

Localidad	ICB	IDCA	K/Na	Na/Ca	Mg/Ca	SO_4/Cl	Cl/CO_3H
Federación	-0.36	-0.234	0.000	5.88	0.40	0.43	0.91
Federación	-0.92	-0.723	0.031	6.03	0.02	0.58	1.45
Federación	-0.87	-0.970	0.018	12.18	0.69	0.35	1.82
Villaguay	-2.95	-0.530	0.027	1.92	0.24	0.00	0.19
Villaguay	-2.63	-0.482	0.030	1.59	0.24	0.00	0.19
Villaguay	-2.09	-0.390	0.030	1.43	0.22	0.00	0.19
Villaguay	-3.36	-0.485	0.019	1.62	0.21	0.00	0.15
Villaguay	-3.09	-0.364	0.023	1.30	0.25	0.00	0.12
Villaguay	-4.24	-0.967	0.019	3.31	0.36	0.45	0.29
Villaguay	-1.71	-0.102	0.328	0.22	0.29	3.34	0.08
Arapey	-5.76	-0.621	0.041	2.98	0.91	0.57	0.11
Arapey	-5.64	-0.633	0.048	2.64	0.62	0.44	0.12
Arapey	-3.75	-1.063	0.038	4.49	0.87	0.45	0.32
Daymán	-4.15	-1.087	0.002	145.72	4.71	0.60	0.31
Daymán	-5.68	-0.964	0.008	17.4	0.47	0.63	0.19
Daymán	-6.26	-1.811	0.011	34.3	0.48	0.81	0.38
P. Ullestie	-0.53	-0.935	0.007	18.87	0.23	0.49	12.13
Almirón	-0.06	-0.178	0.004	7.47	0.02	0.31	136.03
Almirón	-0.32	-0.932	0.002	12.17	0.08	0.34	174.92
Guaviyú	-3.68	-1.313	0.004	118.42	0.37	0.64	0.46
Villa Elisa	-0.59	-0.873	0.003	21.38	0.30	0.66	87.27
Colón	-2.60	-1.496	0.003	112.72	0.22	0.85	1.13

Tabla 4. Número de análisis 00001.
Ubicación de la perforación: Federación 1. Fecha: 23/02/97



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	1.1377	0.4524	6.6990	0.0000	0.0000
Miligramos por litro	22.80	5.50	154.00	0.00	0.00

Aniones

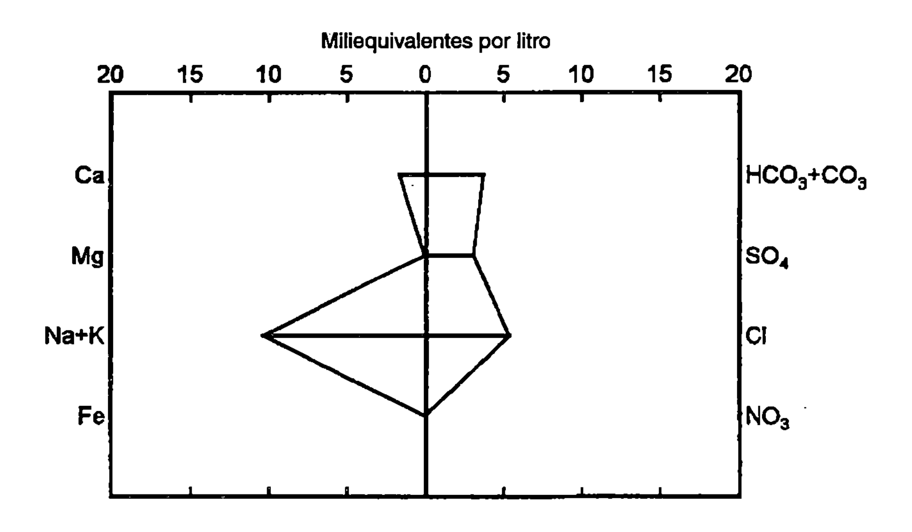
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	5.42509	0.0000	2.12364	4.93506	0.00807
Miligramos por litro	331.00	0.00	102.00	174.94	0.50

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SIO_2**
0.0000			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
670.00	80.00	0.00	1044.00	6.40	7.5129

Cationes (epm) 8.29	**Aniones (epm)**12.49
Error 20.22	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 5. Número de análisis 00002.
Ubicación de la perforación: Federación 2. Fecha: 12/94 (Folleto)



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	1.6567	0.0411	10.0050	0.30684	0.0054
Miligramos por litro	33.20	0.50	230.00	12.00	0.10

Aniones

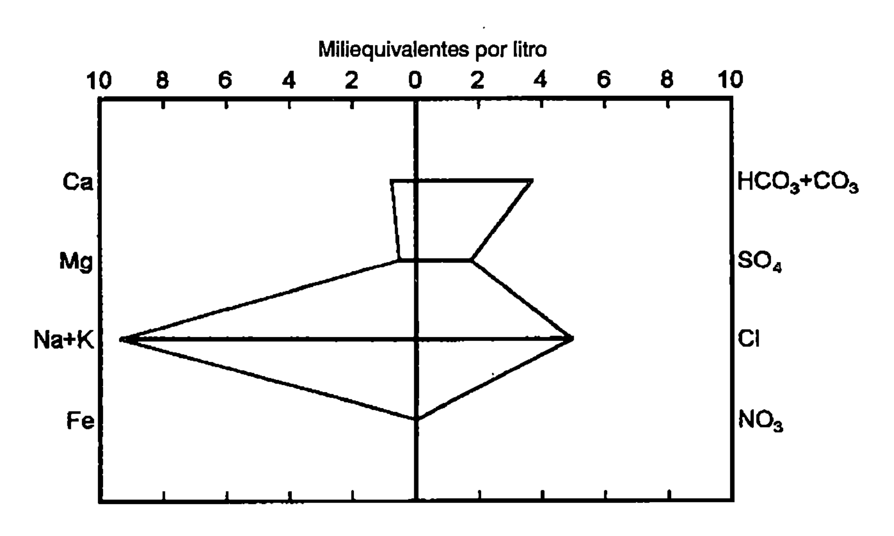
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	3.68775	0.0000	3.12300	5.35793	0.04033
Miligramos por litro	225.00	0.00	150.00	189.93	2.50

Mn	NO_2	PO_4	F	B	SiO_2
0.0000			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
680.00	85.00	0.00	952.00	7.80	10.8589

Cationes (epm) 12.02	**Aniones (epm)** 12.21
Error 0.80	

Tipo de agua Clorurada sódica

Tabla 6. Número de análisis 00003.
Ubicación de la perforación: Termas de Federación. Fecha: 12/03/97



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.7485	0.5182	9.1350	0.15342	0.0000
Miligramos por litro	15.00	6.30	210.00	6.00	0.00

Aniones

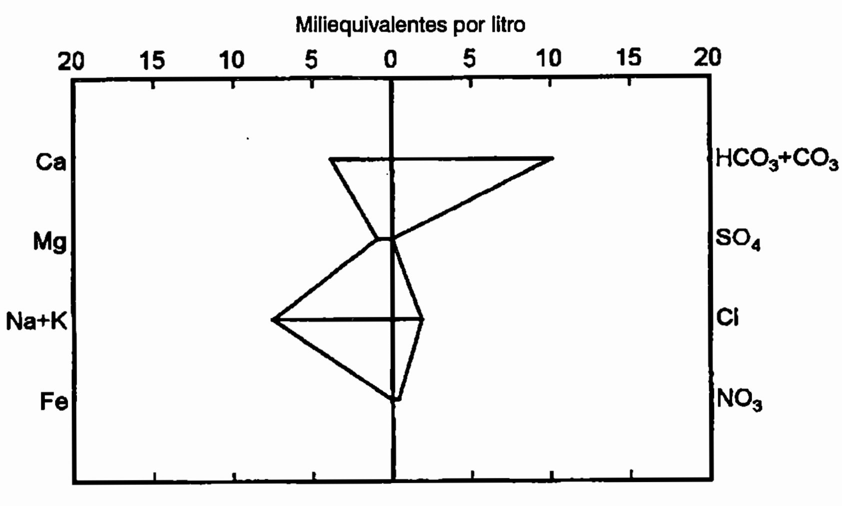
	HCO3	CO3	SO4	Cl	NO3
Miliequivalentes por litro	2.72074	0.9666	1.74888	4.96327	0.00323
Miligramos por litro	166.00	29.00	84.00	175.94	0.20

Mn 0.0000	**NO2**	**PO4**	**F** 0.0000	**B**	**SIO2**
Residuo Seco 699.00	**Dureza** 81.00	**Alcalinidad** 195.00	**Conductividad** 979.00	**pH** 8.20	**RAS** 11.4784

Cationes (epm) 10.56	**Aniones (epm)**10.40
Error 0.73	

Tipo de agua Clorurada sódica

Tabla 7. Número de análisis 00004.
Ubicación de la perforación: Villaguay 1. Fecha: 11/05/96



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	3.8024	0.8964	7.3080	0.20464	0.0269
Miligramos por litro	76.20	10.90	168.00	8.00	0.50

Aniones

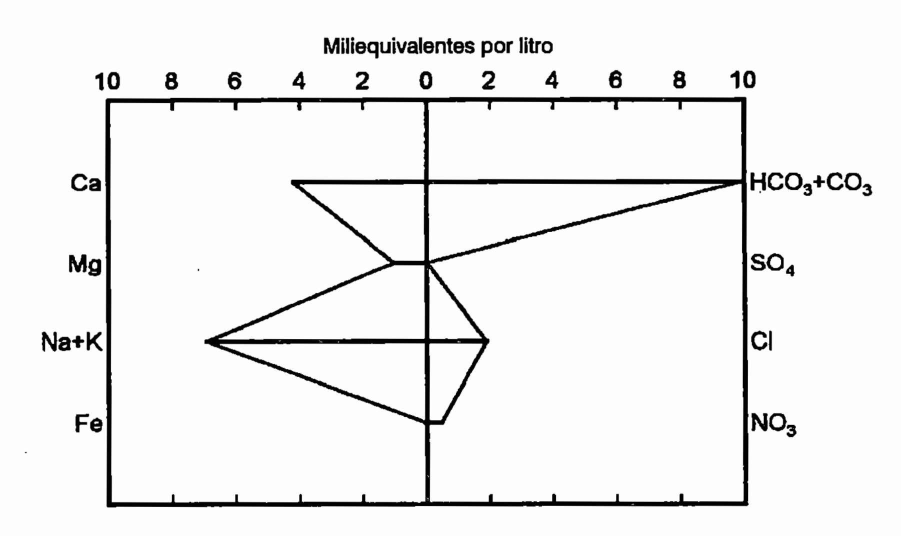
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	10.09624	0.0000	0.0000	1.88940	0.46454
Miligramos por litro	616.00	0.00	0.00	66.98	28.80

Mn	NO_2	PO_4	F	B	SiO_2
0.0036			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
0.00	0.00	0.00	870.00	7.20	4.7678

Cationes (epm) 12.24	**Aniones (epm)** 12.45
Error 0.84	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 8. Número de análisis 00005.
Ubicación de la perforación: Villaguay 2. Fecha: 11/05/96



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	4.2016	1.0033	6.6990	0.20464	0.0269
Miligramos por litro	84.20	12.20	154.00	8.00	0.50

Aniones

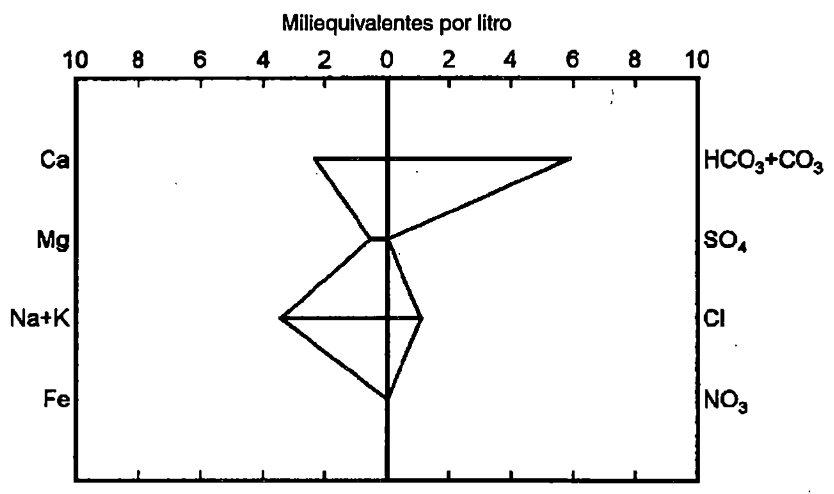
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	9.89956	0.0000	0.0000	1.88940	0.47906
Miligramos por litro	604.00	0.00	0.00	66.98	29.70

Mn	NO_2	PO_4	F	B	SiO_2
0.0000			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
0.00	0.00	0.00	900.00	7.30	4.1526

Cationes (epm) 12.14	**Aniones (epm)**12.27
Error 0.54	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 9. Número de análisis 00006.
Ubicación de la perforación: Villaguay 3. Fecha: 11/05/96



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	2.3004	0.5017	3.3060	0.10232	0.0000
Miligramos por litro	46.10	6.10	76.00	4.00	0.00

Aniones

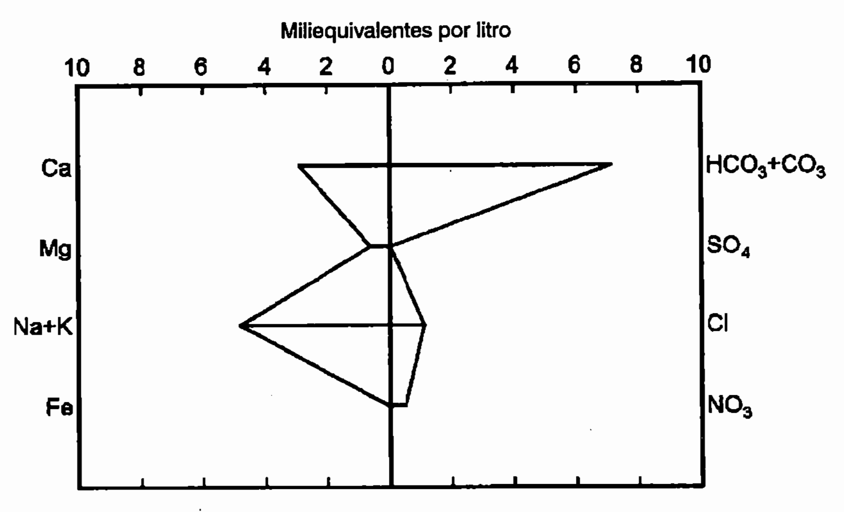
	HCO3	CO3	SO4	Cl	NO3
Miliequivalentes por litro	5.90040	0.00000	0.00000	1.09980	0.00000
Miligramos por litro	360.00	0.00	0.00	38.99	0.00

Mn 0.0000	**NO2**	**PO4**	**F** 0.0000	**B**	**SiO2**
Residuo Seco 0.00	**Dureza** 0.00	**Alcalinidad** 0.00	**Conductividad** 440.00	**pH** 7.40	**RAS** 2.7931

Cationes (epm) 6.21	**Aniones (epm)**7.00
Error 5.98	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 10. Número de análisis 00007.
Ubicación de la perforación: Villaguay 4. Fecha: 11/05/96



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	2.8992	0.6004	4.6980	0.10232	0.0107
Miligramos por litro	58.10	7.30	108.00	4.00	0.20

Aniones

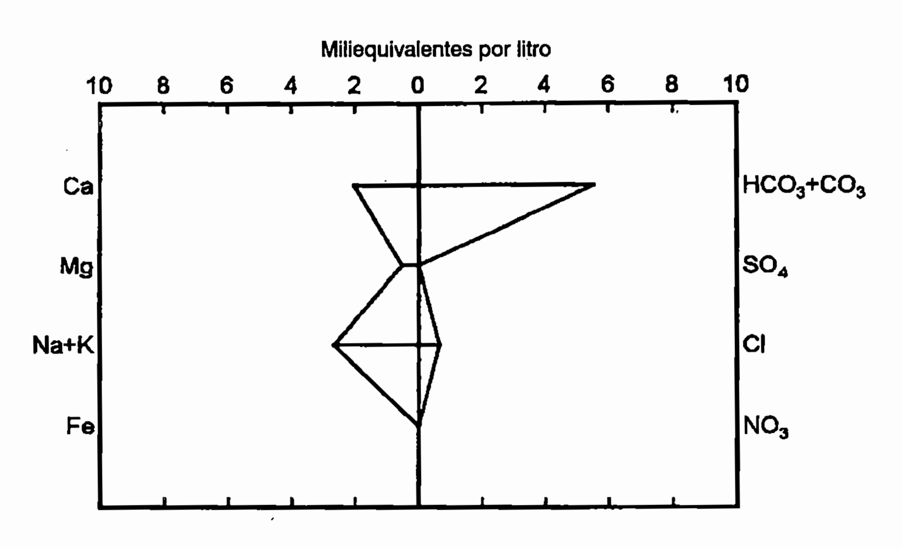
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	7.09687	0.0000	0.00000	1.09980	0.50003
Miligramos por litro	433.00	0.00	0.00	38.99	31.00

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SiO_2**
0.0036			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
0.00	0.00	0.00	560.00	7.40	3.5516

Cationes (epm) 8.31	**Aniones (epm)**8.70
Error 2.25	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 11. Número de análisis 00008.
Ubicación de la perforación: Villaguay 5.



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	2.0010	0.5017	2.6100	0.05116	0.0054
Miligramos por litro	40.10	6.10	60.00	2.00	0.10

Aniones

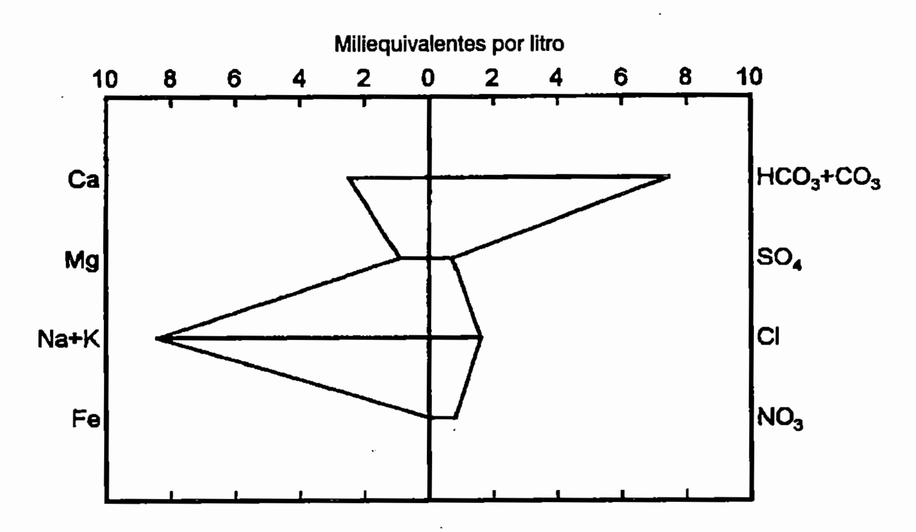
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	5.50704	0.0000	0.00000	0.64860	0.02097
Miligramos por litro	336.00	0.00	0.00	22.99	1.30

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SiO_2**
0.0000			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
0.00	0.00	0.00	390.00	7.40	2.3332

Cationes (epm) 5.17	**Aniones (epm)** 6.18
Error 8.88	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 12. Número de análisis 00009.
Ubicación de la perforación: Villaguay. Fecha: 12/03/97.



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	2.4950	0.9046	8.2650	0.15348	0.0000
Miligramos por litro	50.00	11.00	190.00	6.00	0.00

Aniones

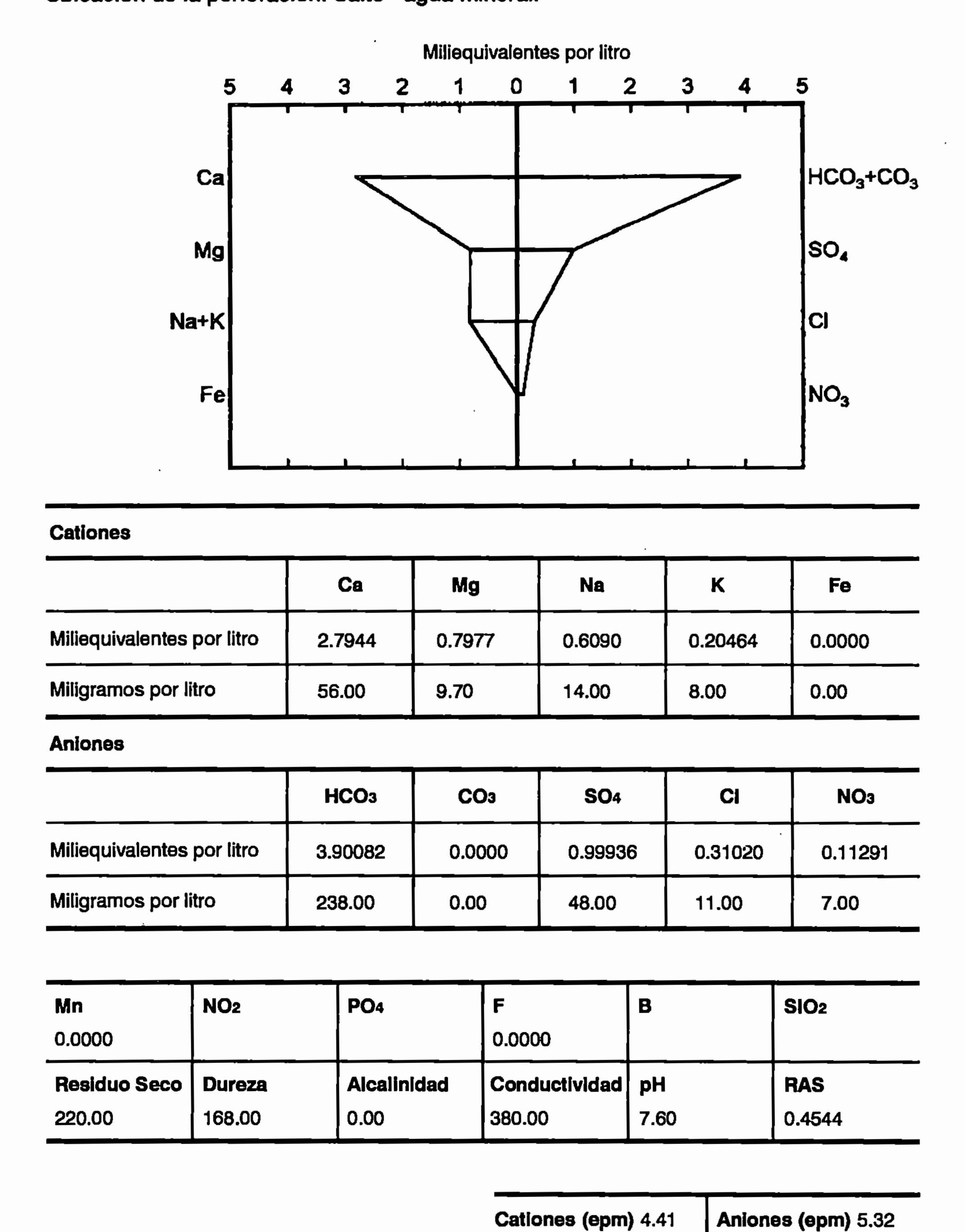
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	5.50704	1.9665	0.72870	1.60740	0.80650
Miligramos por litro	336.00	59.00	35.00	56.98	50.00

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SiO_2**
0.0000			0.0211		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
729.00	200	395.00	1021.00	7.60	6.3393

Cationes (epm) 11.84	**Aniones (epm)** 10.64
Error 5.26	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 13. Número de análisis 00010.
Ubicación de la perforación: Salto - agua mineral.



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	2.7944	0.7977	0.6090	0.20464	0.0000
Miligramos por litro	56.00	9.70	14.00	8.00	0.00

Aniones

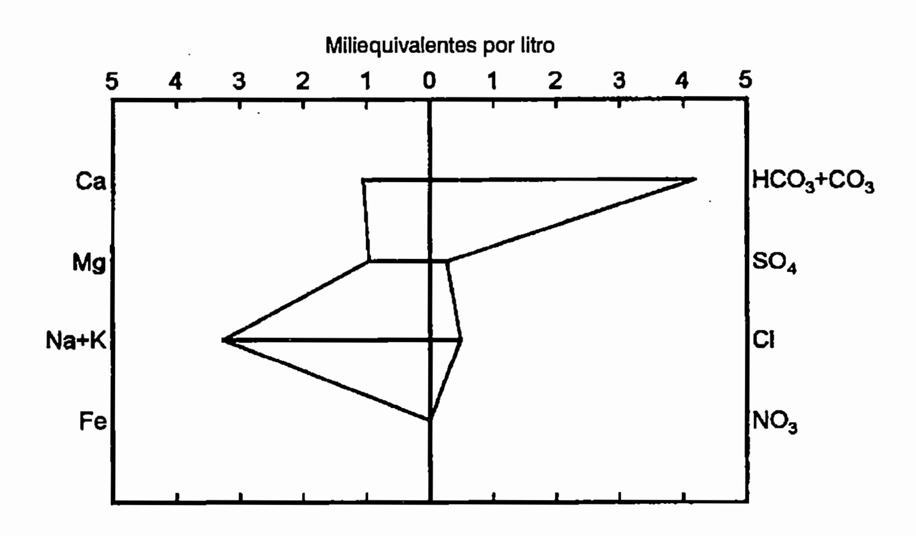
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	3.90082	0.0000	0.99936	0.31020	0.11291
Miligramos por litro	238.00	0.00	48.00	11.00	7.00

Mn 0.0000	**NO_2**	**PO_4**	**F** 0.0000	**B**	**SiO_2**
Residuo Seco 220.00	**Dureza** 168.00	**Alcalinidad** 0.00	**Conductividad** 380.00	**pH** 7.60	**RAS** 0.4544

Cationes (epm) 4.41	**Aniones (epm)** 5.32
Error 9.43	

Tipo de agua Bicarbonada cálcica

Tabla 14. Número de análisis 00011.
Ubicación de la perforación: Arapey 1 (J. Montaño)



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	1.0479	0.9542	3.1320	0.12785	0.0107
Miligramos por litro	21.00	11.60	72.00	5.00	0.20

Aniones

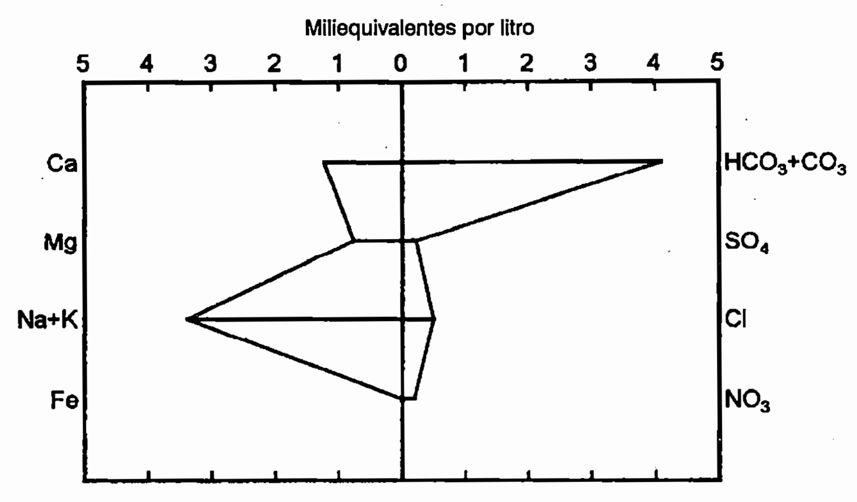
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	4.19584	0.0000	0.27066	0.47929	0.00000
Miligramos por litro	256.00	0.00	13.00	16.99	0.00

Mn 0.0000	**NO_2**	**PO_4**	**F** 0.0000	**B**	**SiO_2**
Residuo Seco 288.00	**Dureza** 101.00	**Alcalinidad** 0.00	**Conductividad** 440.00	**pH** 7.80	**RAS** 3.1303

Cationes (epm) 5.27	**Aniones (epm)** 4.95
Error 3.20	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 15. Número de análisis 00012.
Ubicación de la perforación: Arapey 2. Fecha: 18/07/85 (Fili)



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	1.2176	0.7486	3.2190	0.15348	0.0000
Miligramos por litro	24.40	9.10	74.00	6.00	0.00

Aniones

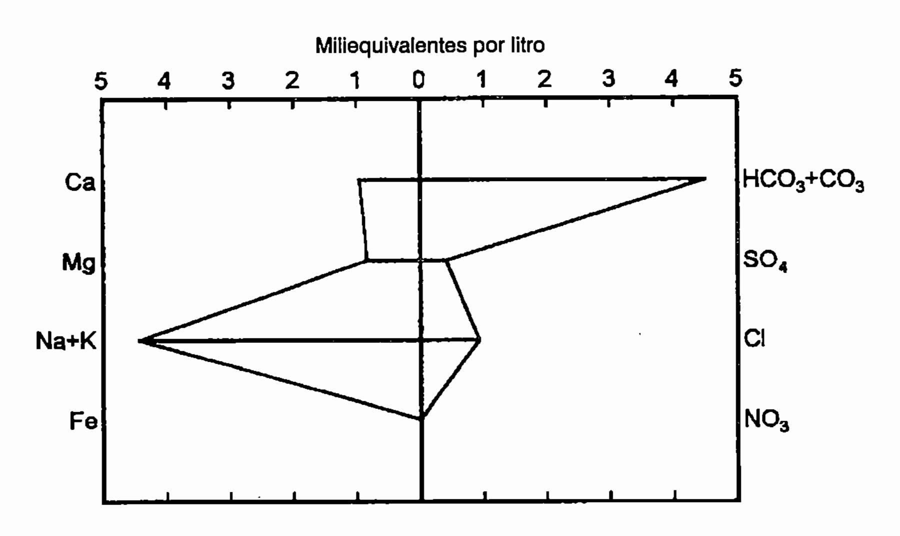
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	4.09750	0.0000	0.22902	0.50760	0.20163
Miligramos por litro	250.00	0.00	11.00	17.99	12.50

Mn 0.0000	**NO_2**	**PO_4**	**F** 0.0000	**B**	**SiO_2**
Residuo Seco 256.00	**Dureza** 99.00	**Alcalinidad** 0.00	**Conductividad** 358.00	**pH** 7.50	**RAS** 3.2466

Cationes (epm) 5.34	**Aniones (epm)** 5.04
Error 2.92	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 16. Número de análisis 00013.
Ubicación de la perforación: Termas de Arapey. Fecha: 11/03/97



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.9481	0.8224	4.2630	0.15348	0.0000
Miligramos por litro	19.00	10.00	98.00	6.00	0.00

Aniones

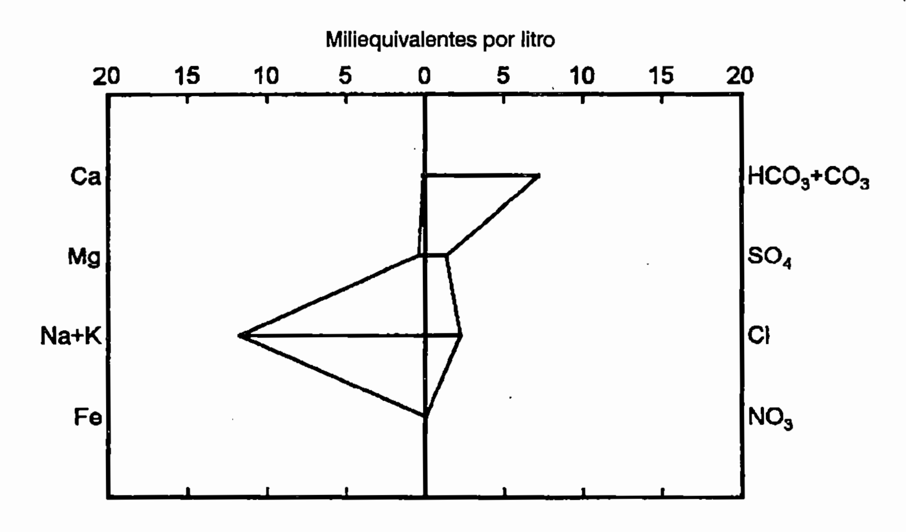
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	2.86825	1.6332	0.41640	0.93060	0.00161
Miligramos por litro	175.00	49.00	20.00	32.99	0.10

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SiO_2**
0.0000			0.0105		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
297.00	105.00	224.00	416.00	8.20	4.5309

Cationes (epm) 6.19	**Aniones (epm)** 5.86
Error 2.71	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 17. Número de análisis 00014.
Ubicación de la perforación: Daymán 1. Fecha: 19/07/85 (Fili)



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.0798	0.3784	11.6580	0.02557	0.0000
Miligramos por litro	1.60	4.60	268.00	1.00	0.00

Aniones

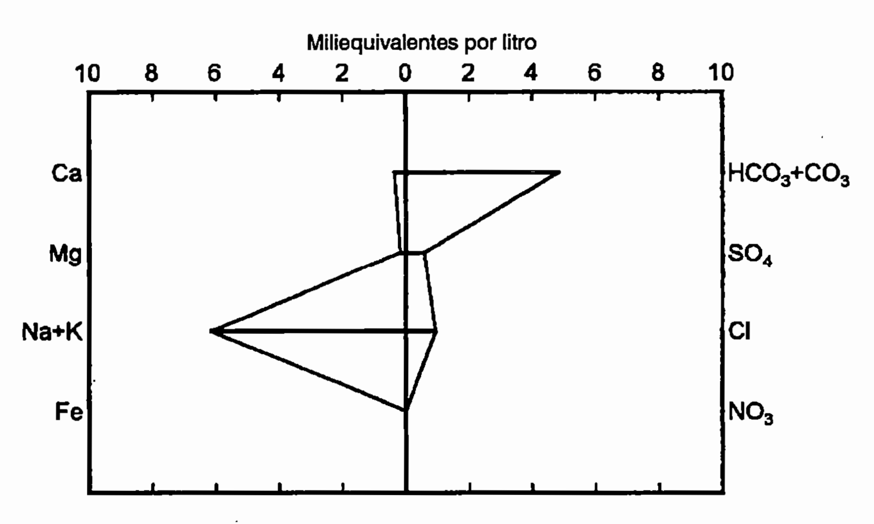
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	7.24438	0.0000	1.35330	2.25595	0.06129
Miligramos por litro	442.00	0.00	65.00	79.97	3.80

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SiO_2**
0.0000			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
696.00	23.00	0.00	975.00	7.60	24.3554

Cationes (epm) 12.14	**Aniones (epm)** 10.91
Error 5.32	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 18. Número de análisis 00015.
Ubicación de la perforación: Daymán 2 (J. Montaño)



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.3493	0.1645	6.0900	0.05114	0.0000
Miligramos por litro	7.00	2.00	140.00	2.00	0.00

Aniones

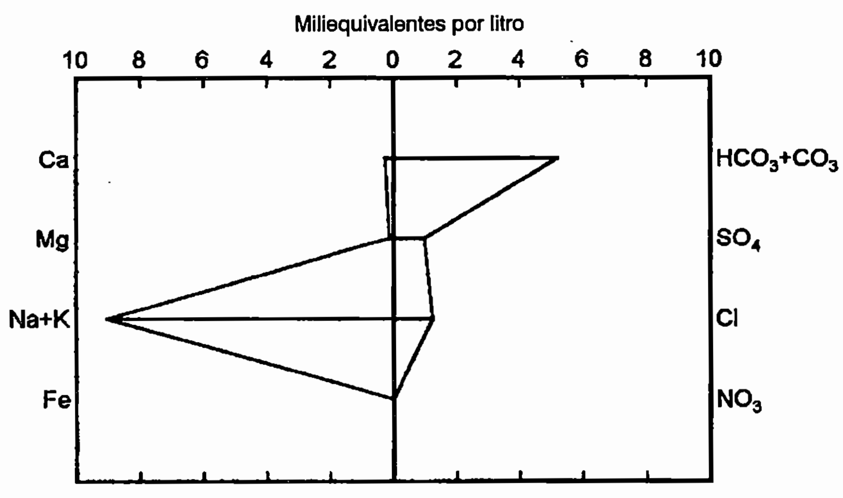
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	4.83505	0.0000	0.58296	0.93065	0.00000
Miligramos por litro	295.00	0.00	28.00	32.99	0.00

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SiO_2**
0.0000			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
0.00	0.00	0.00	806.00	0.00	12.0151

Cationes (epm) 6.65	**Aniones (epm)** 6.35
Error 2.36	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 19. Número de análisis 00016.
Ubicación de la perforación: Termas de Daymán. Fecha: 11/03/97



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.2595	0.1234	8.9175	0.10228	0.0107
Miligramos por litro	5.20	1.50	205.00	4.00	0.20

Aniones

	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	3.27800	1.9331	0.99936	1.24068	0.00161
Miligramos por litro	200.00	58.00	48.00	43.98	0.10

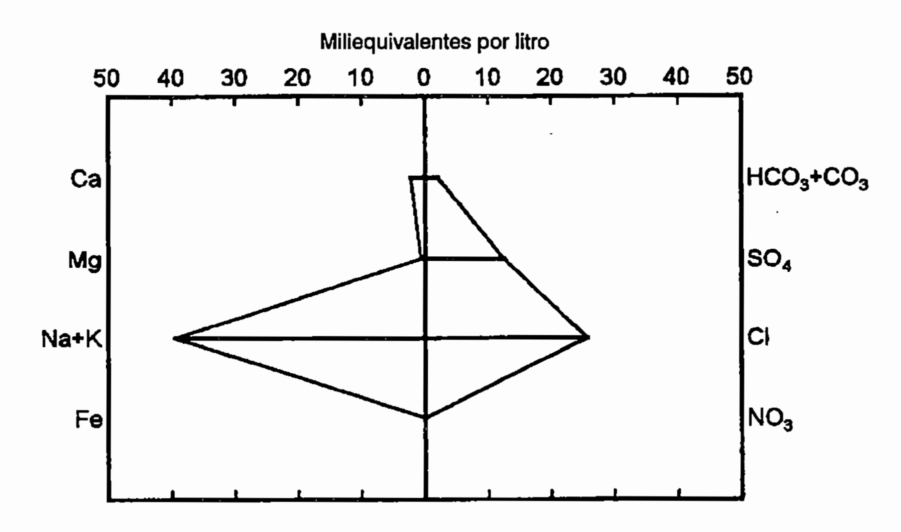
Mn 0.0000	**NO_2**	**PO_4**	**F** 0.0316	**B**	**SiO_2**
Residuo Seco 455.00	**Dureza** 24.00	**Alcalinidad** 258.00	**Conductividad** 637.00	**pH** 8.40	**RAS** 20.3813

Cationes (epm) 9.41	**Aniones (epm)** 7.48

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Error 11.42

Tabla 20. Número de análisis 00017.
Ubicación de la perforación: Paso Ullestie (J. Montaño)



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	2.0709	0.4771	39.1500	0.25570	0.0000
Miligramos por litro	41.50	5.80	900.00	10.00	0.00

Aniones

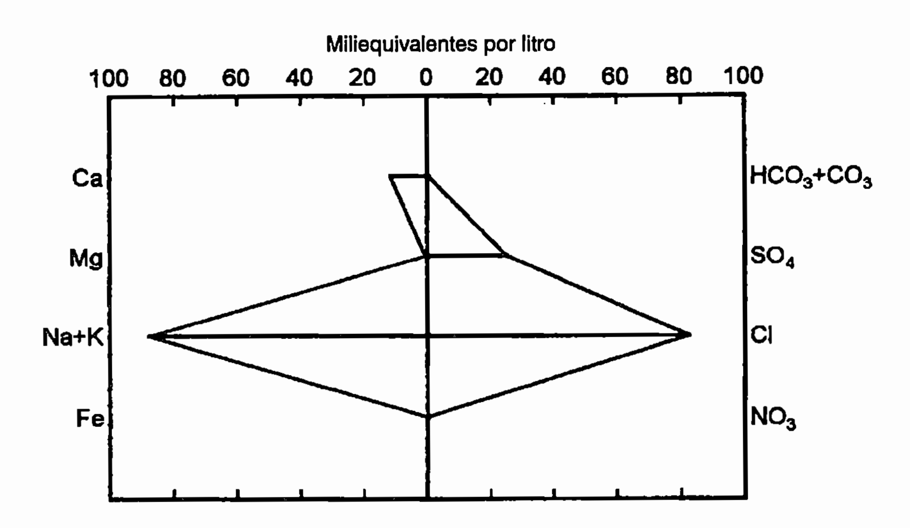
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	2.11431	0.0000	12.53364	25.71849	0.00000
Miligramos por litro	129.00	0.00	602.00	911.68	0.00

Mn 0.0000	**NO_2**	**PO_4**	**F** 0.0000	**B**	**SiO_2**
Residuo Seco 2605.00	**Dureza** 128.00	**Alcalinidad** 0.00	**Conductividad** 3000.00	**pH** 0.00	**RAS** 34.6857

Cationes (epm) 41.95	**Aniones (epm)** 40.37
Error 1.93	

Tipo de agua Clorurada sódica

Tabla 21. Número de análisis 00018.
Ubicación de la perforación: Guichón - Almirón (J. Montaño)



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	11.6267	0.2386	87.0000	0.38381	0.0000
Miligramos por litro	233.00	2.90	2000.00	15.01	0.00

Aniones

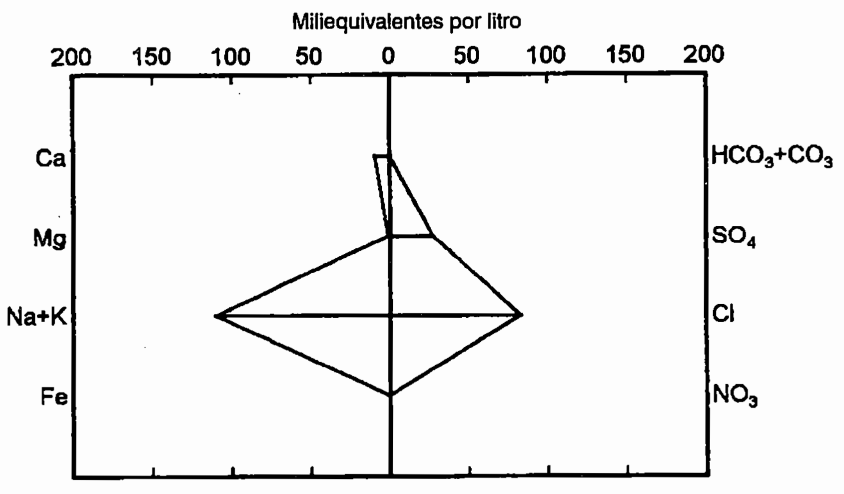
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	0.60643	0.0000	25.29630	82.76701	0.00000
Miligramos por litro	37.00	0.00	1215.00	2933.96	0.00

Mn	NO_2	PO_4	F	B	SiO_2
0.0000			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
6344.00	595.00	0.00	8000.00	7.20	35.7187

Cationes (epm) 99.25	**Aniones (epm)** 108.67
Error 4.53	

Tipo de agua Clorurada sódica

Tabla 22. Número de análisis 00019.
Ubicación de la perforación: Termas de Almirón. Fecha: 11/03/97



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	8.9820	0.7321	109.4895	0.25570	0.0107
Miligramos por litro	180.00	8.90	2517.00	10.00	0.20

Aniones

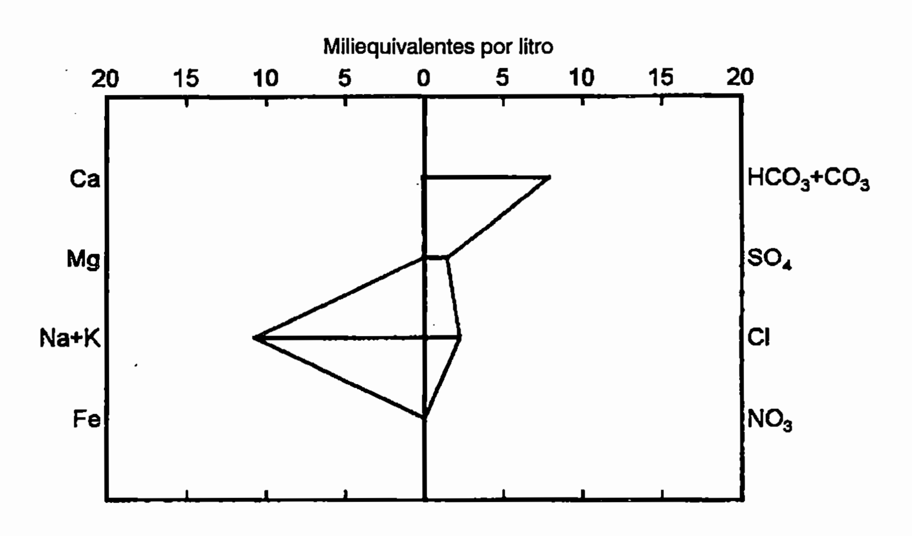
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	0.47531	0.0000	28.04454	83.18988	0.00161
Miligramos por litro	29.00	0.00	1347.00	2948.95	0.10

Mn 0.0036	**NO_2**	**PO_4**	**F** 0.0263	**B**	**SiO_2**
Residuo Seco 7073.00	**Dureza** 618.00	**Alcalinidad** 29.00	**Conductividad** 9902.00	**pH** 7.80	**RAS** 49.6805

Cationes (epm) 119.47	**Aniones (epm)** 111.74
Error 3.35	

Tipo de agua Clorurada sódica

Tabla 23. Número de análisis 00020.
Ubicación de la perforación: Termas de Guaviyú. Fecha: 11/03/97



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.0898	0.0329	10.6575	0.05114	0.0000
Miligramos por litro	1.80	0.40	245.00	2.00	0.00

Aniones

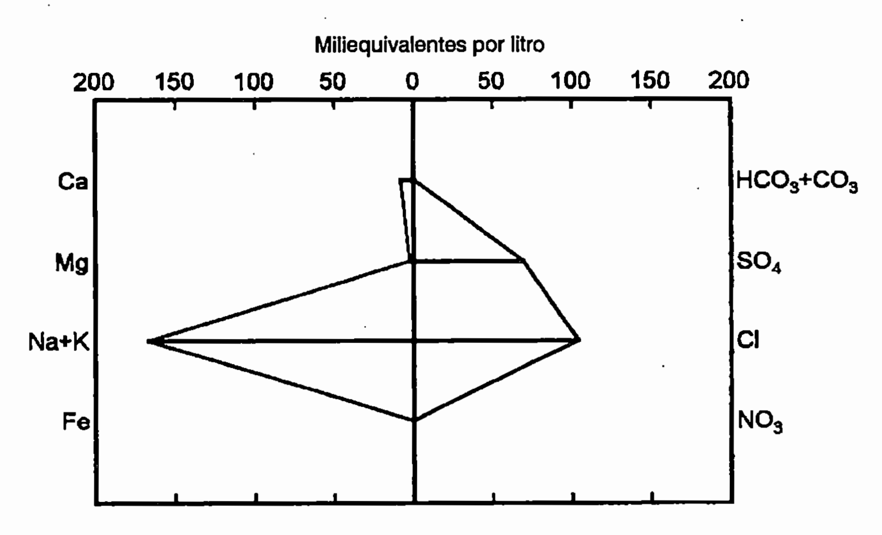
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	4.94978	2.9330	1.45740	2.28416	0.00161
Miligramos por litro	302.00	88.00	70.00	80.97	0.10

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SIO_2**
0.0000			0.0526		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
712.00	10.00	390.00	997.00	8.70	43.0235

Cationes (epm) 10.83	**Aniones (epm)** 11.68
Error 3.76	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 24. Número de análisis 00021.
Ubicación de la perforación: Villa Elisa. Fecha: 10/03/97



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	7.7345	2.3027	165.6915	0.51160	0.0698
Miligramos por litro	155.00	27.99	3809.00	20.01	1.30

Aniones

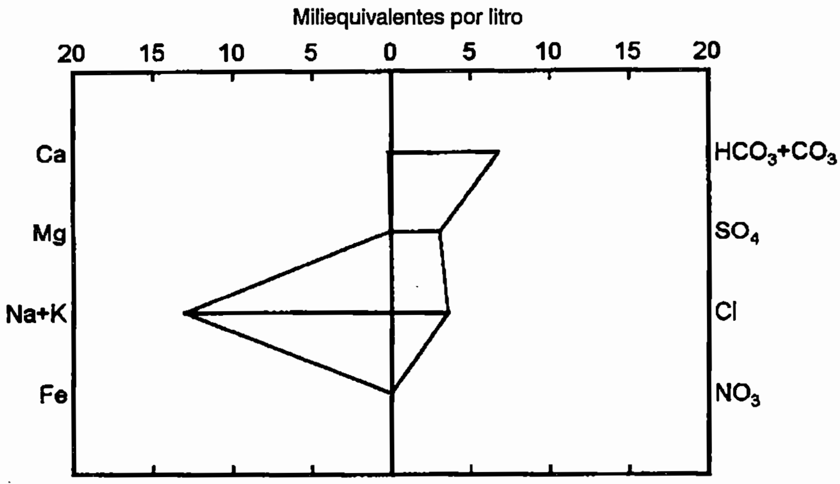
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	1.19647	0.0333	69.53880	104.48100	0.00161
Miligramos por litro	73.00	1.00	3340.00	3703.69	0.10

Mn	NO_2	PO_4	F	B	SiO_2
0.0036			0.0000		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
8730.00	542.00	83.00	12222.00	8.00	73.9620

Cationes (epm) 176.31	**Aniones (epm)** 175.25
Error 0.30	

Tipo de agua Clorurada sódica

Tabla 25. Número de análisis 00022.
Ubicación de la perforación: Colón. Fecha: 10/03/97



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	0.1148	0.0247	12.9630	0.02557	0.0000
Miligramos por litro	2.30	0.30	298.00	1.00	0.00

Aniones

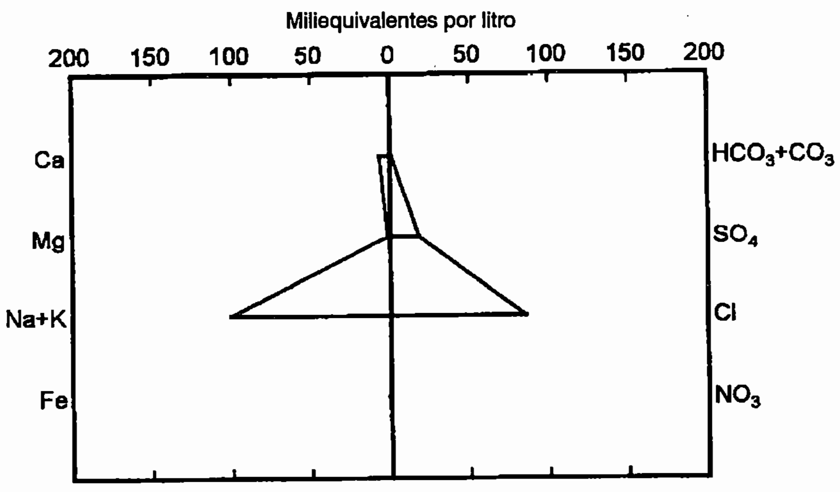
	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	3.19605	3.5663	3.08136	3.60947	0.00161
Miligramos por litro	195.00	107.00	148.00	127.95	0.10

Mn	**NO_2**	**PO_4**	**F**	**B**	**SIO_2**
0.0000			0.1263		
Residuo Seco	**Dureza**	**Alcalinidad**	**Conductividad**	**pH**	**RAS**
774.00	5.00	302.00	1084.00	8.70	49.0924

Cationes (epm) 13.13	**Aniones (epm)** 13.58
Error 1.70	

Tipo de agua Bicarbonada sódica

Tabla 26. Número de análisis 00023.
Ubicación de la perforación: Concepción del Uruguay - Basaltos.



Cationes

	Ca	Mg	Na	K	Fe
Miliequivalentes por litro	5.8682	1.2504	99.6759	0.40401	
Miligramos por litro	117.60	15.20	2291.40	15.80	

Aniones

	HCO_3	CO_3	SO_4	Cl	NO_3
Miliequivalentes por litro	1.35709		18.38822	86.06871	
Miligramos por litro	82.80		883.20	3051.00	

Mn	NO_2	PO_4	F	B	SiO_2
Residuo Seco 6278.00	**Dureza**	**Alcalinidad** 67.90	**Conductividad** 9000.00	**pH** 7.40	**RAS** 52.8333

Cationes (epm) 107.20	**Aniones (epm)** 105.81

Tipo de agua Clorurada sódica

Error 0.65

Figura 1. Diagrama de Schöeller

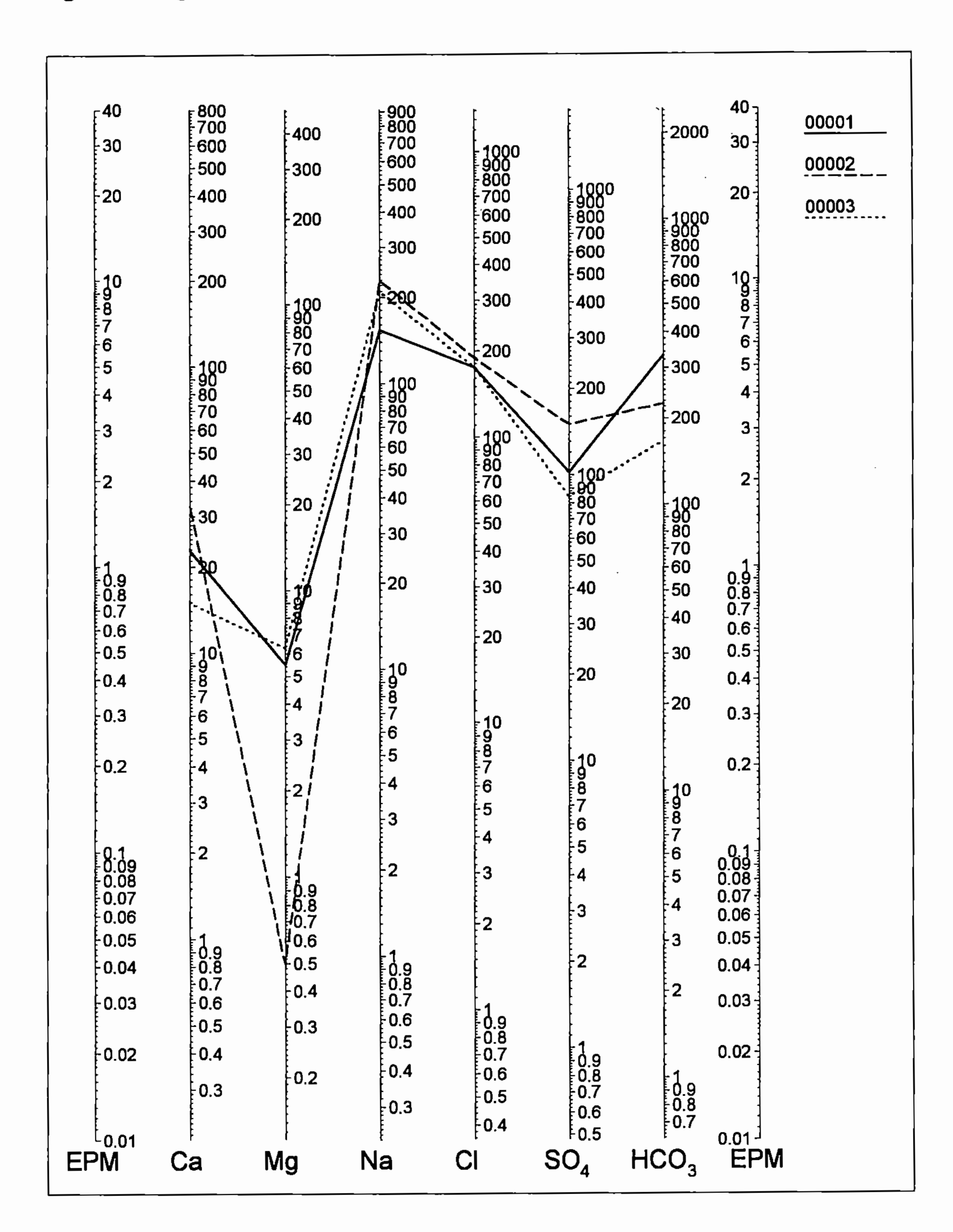


Figura 2. Diagrama de Piper

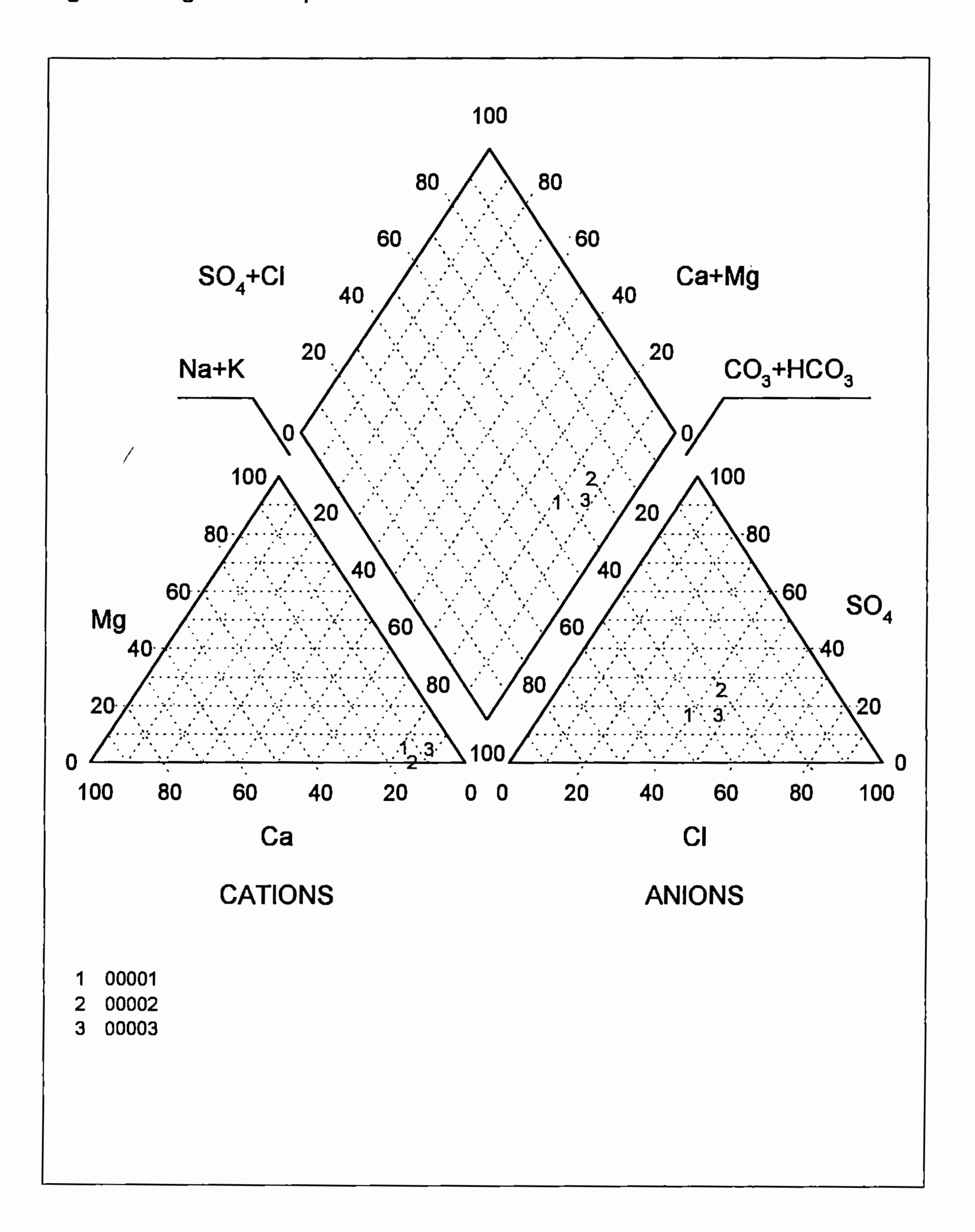


Figura 3. Diagrama de Schöeller

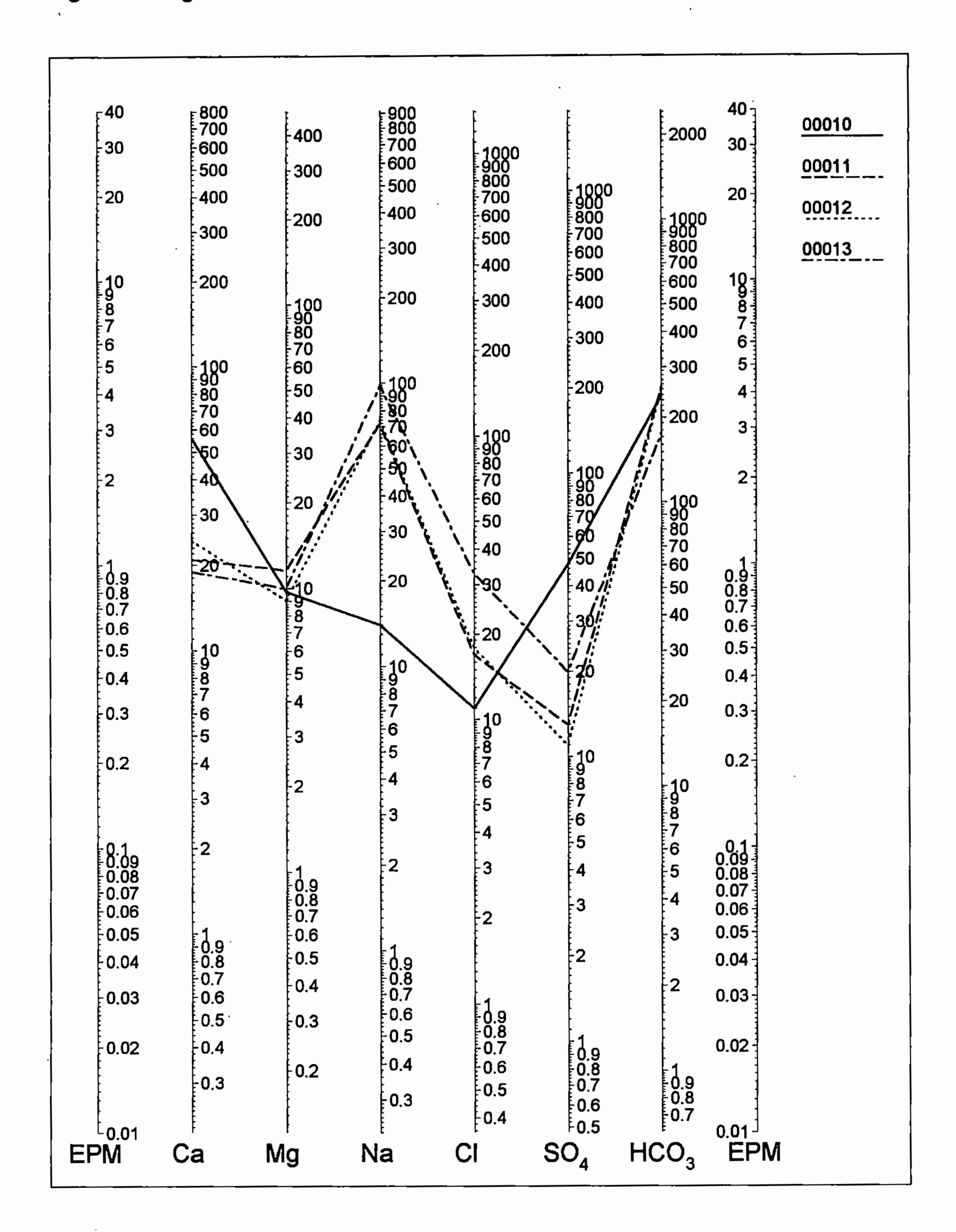


Figura 4. Diagrama de Piper

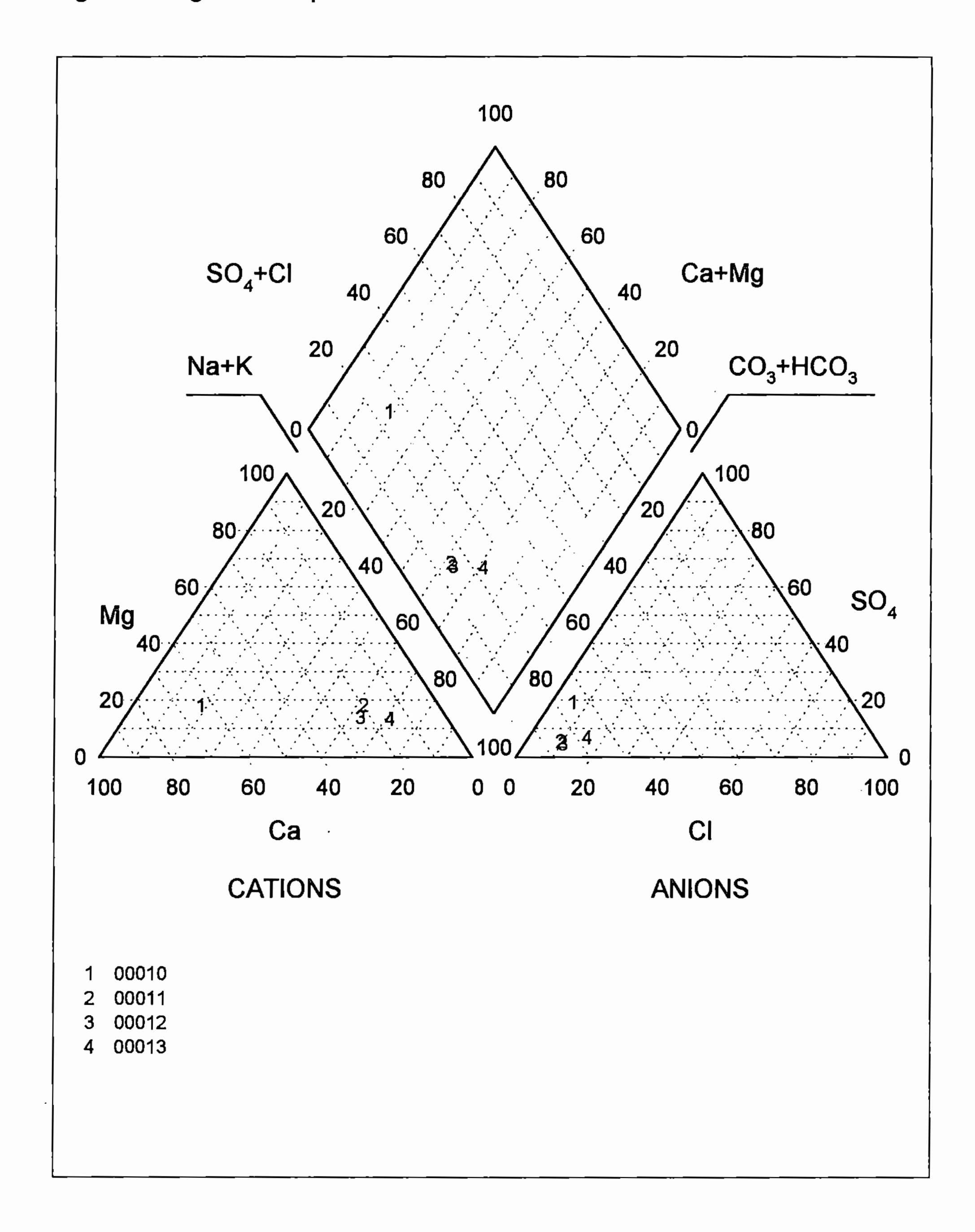


Figura 5. Diagrama de Schöeller

EPM Ca Mg Na Cl SO_4 HCO_3 EPM

00014 ——

00015 – –

00016 .....

Figura 6. Diagrama de Piper

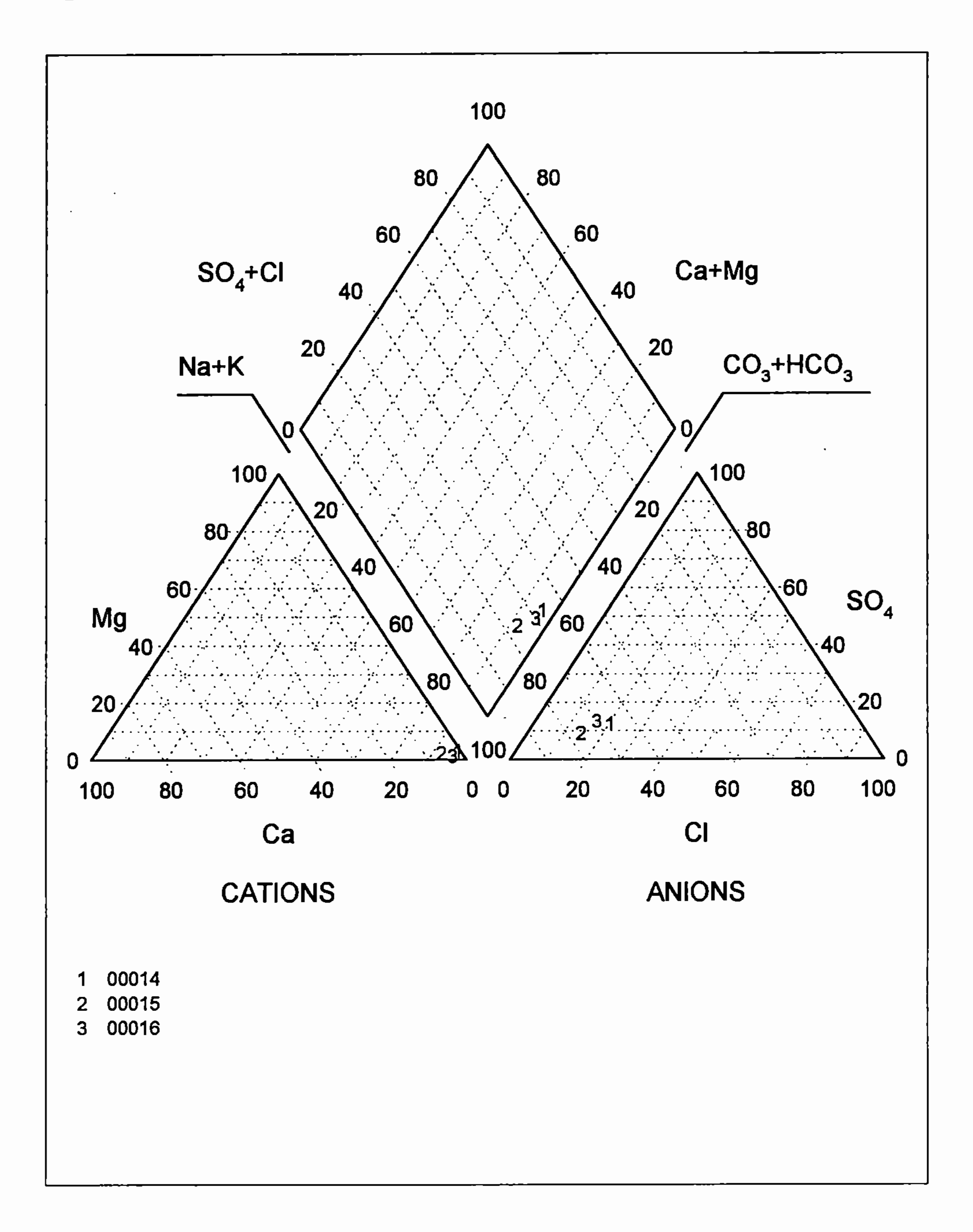


Figura 7. Diagrama de Schöeller

00017

EPM Ca Mg Na Cl SO_4 HCO_3 EPM

Figura 8. Diagrama de Piper

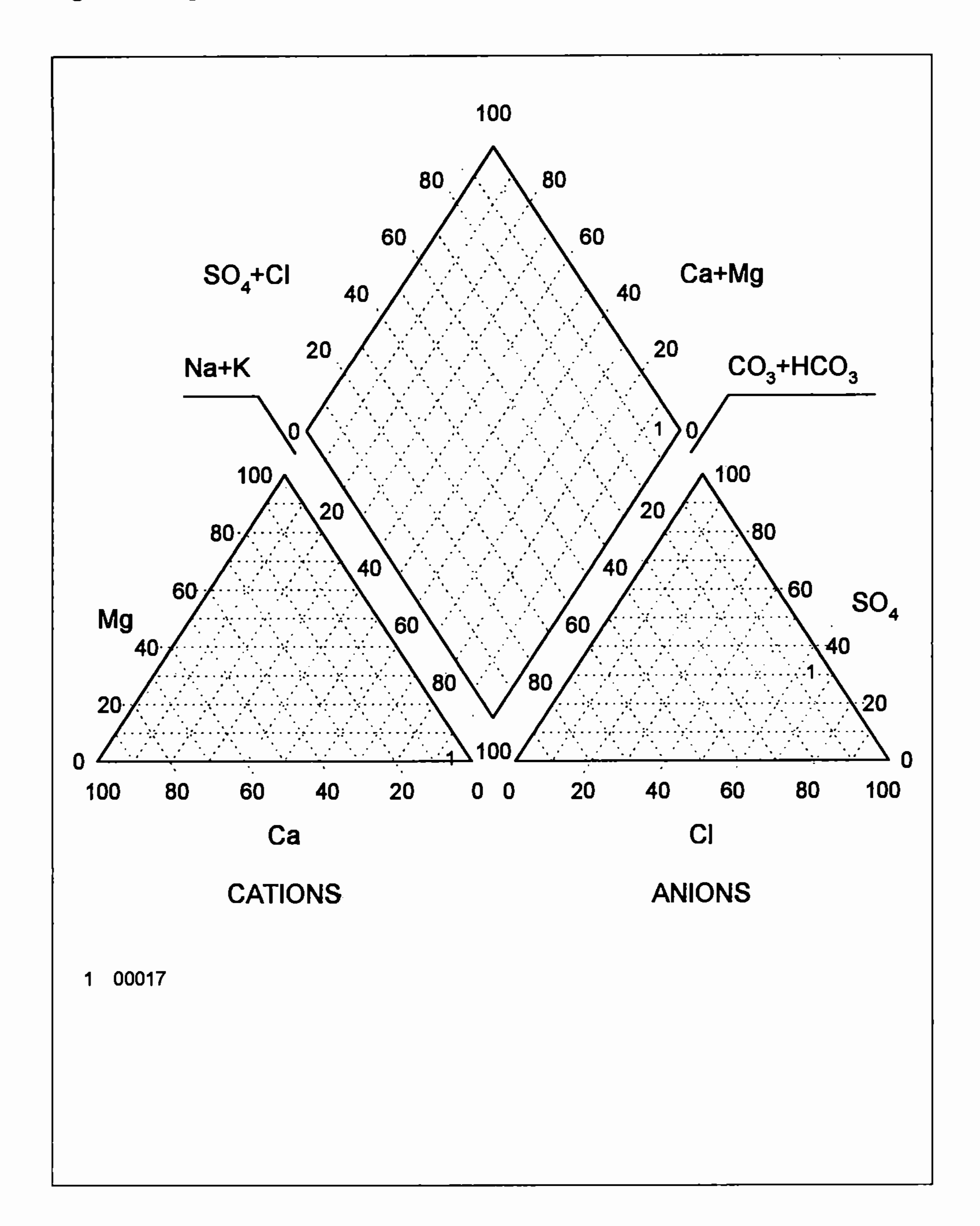


Figura 9. Diagrama de Schöeller

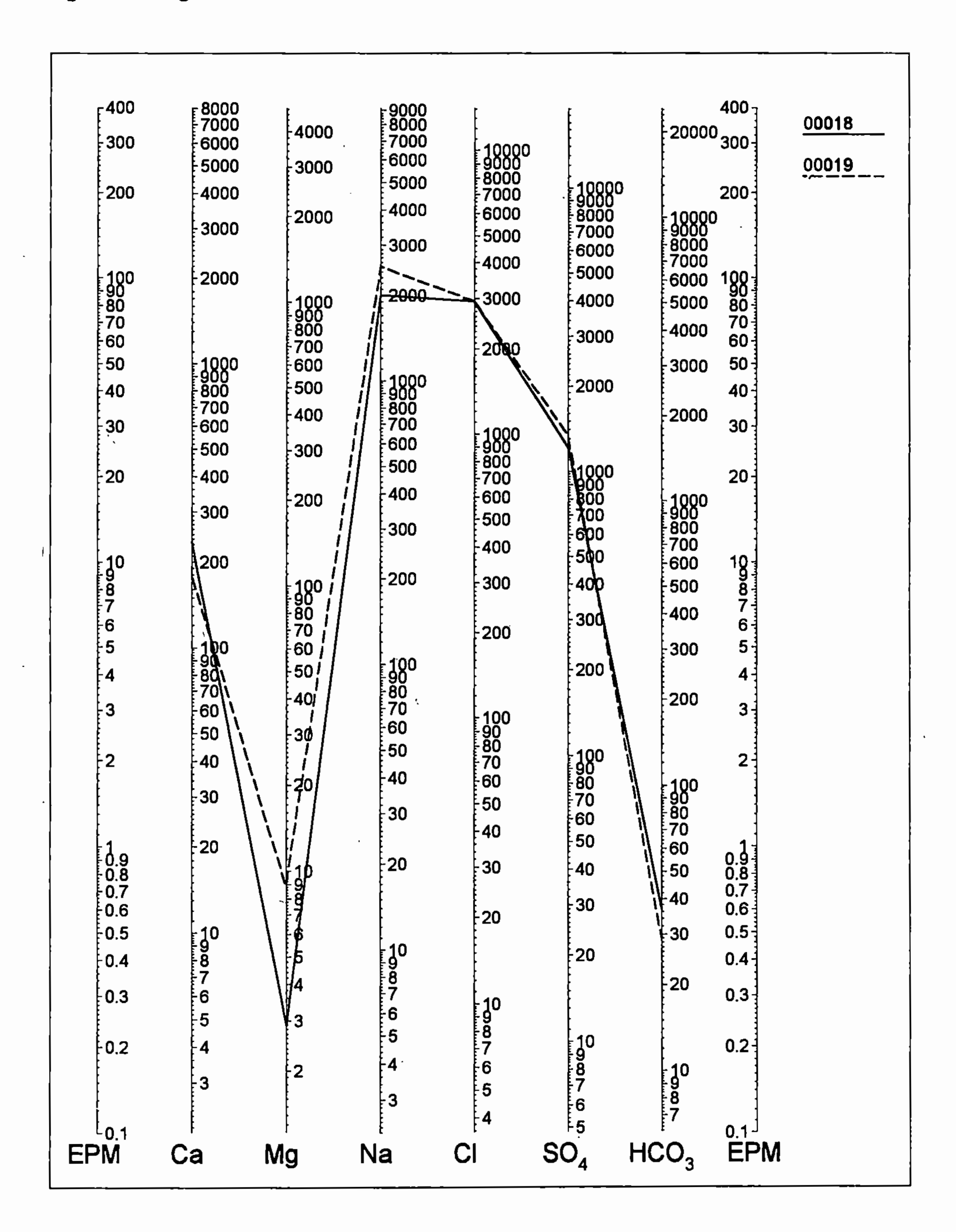


Figura 10. Diagrama de Piper

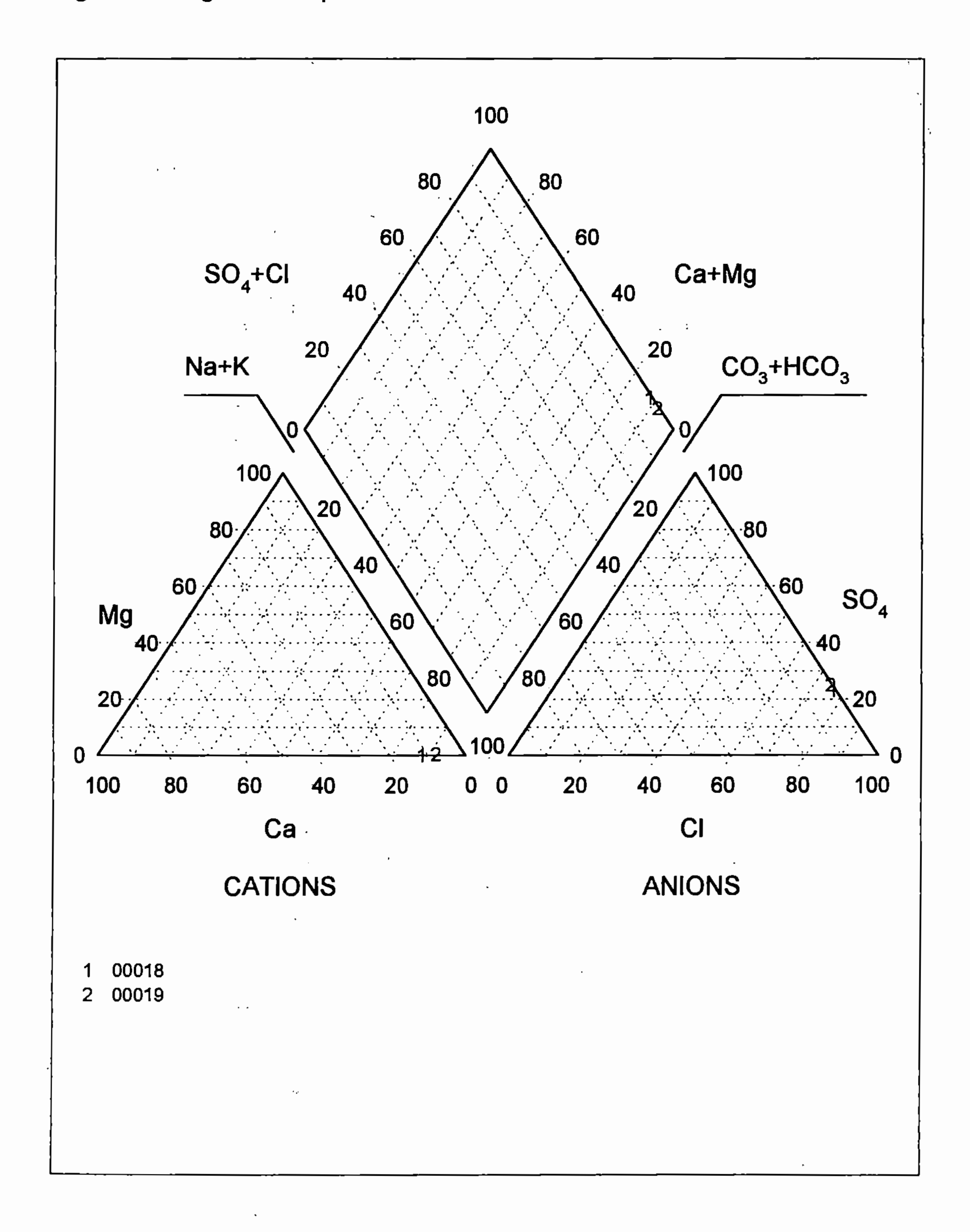


Figura 11. Diagrama de Schöeller

00020

EPM Ca Mg Na Cl SO_4 HCO_3 EPM

Figura 12. Diagrama de Piper

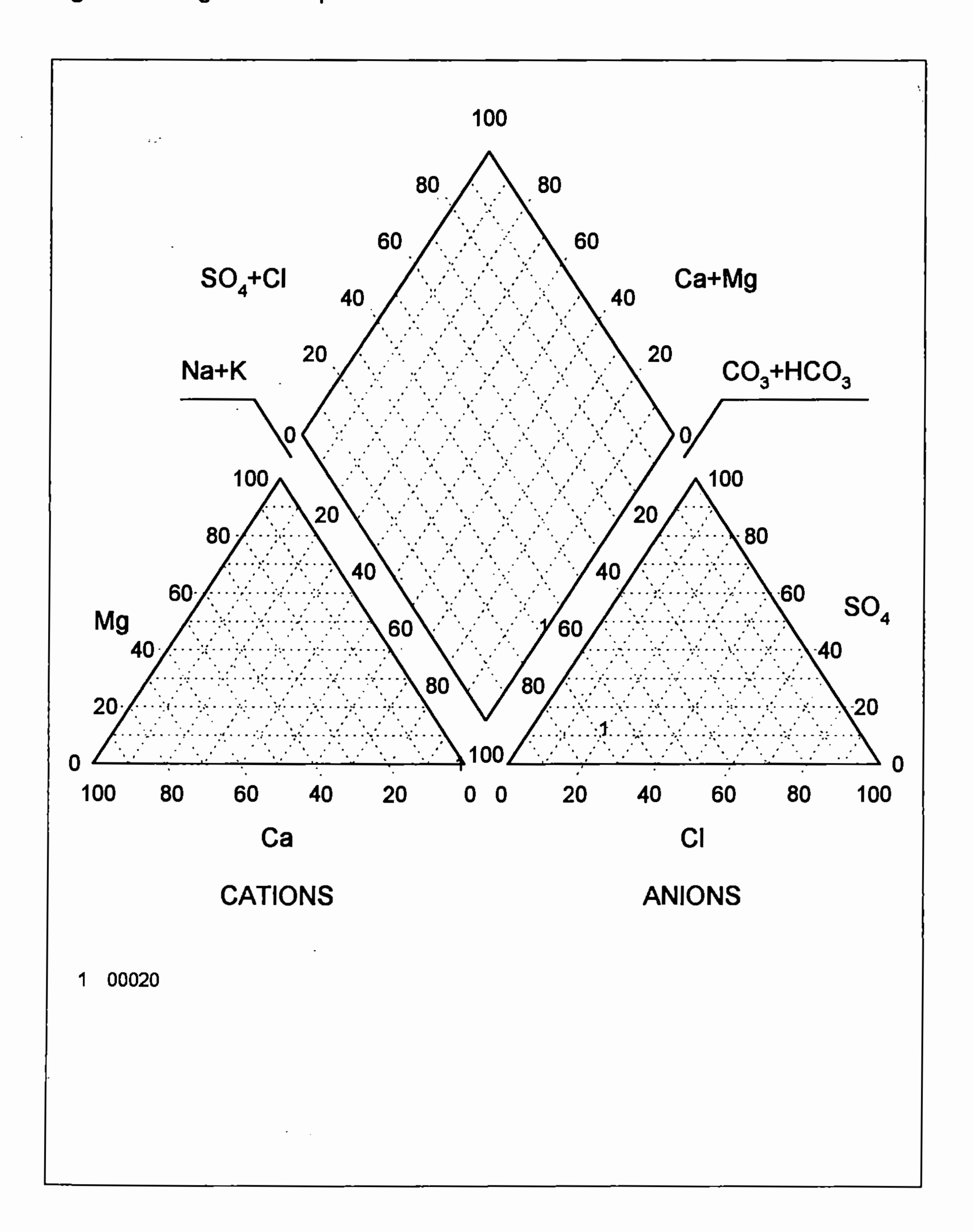


Figura 13. Diagrama de Schöeller

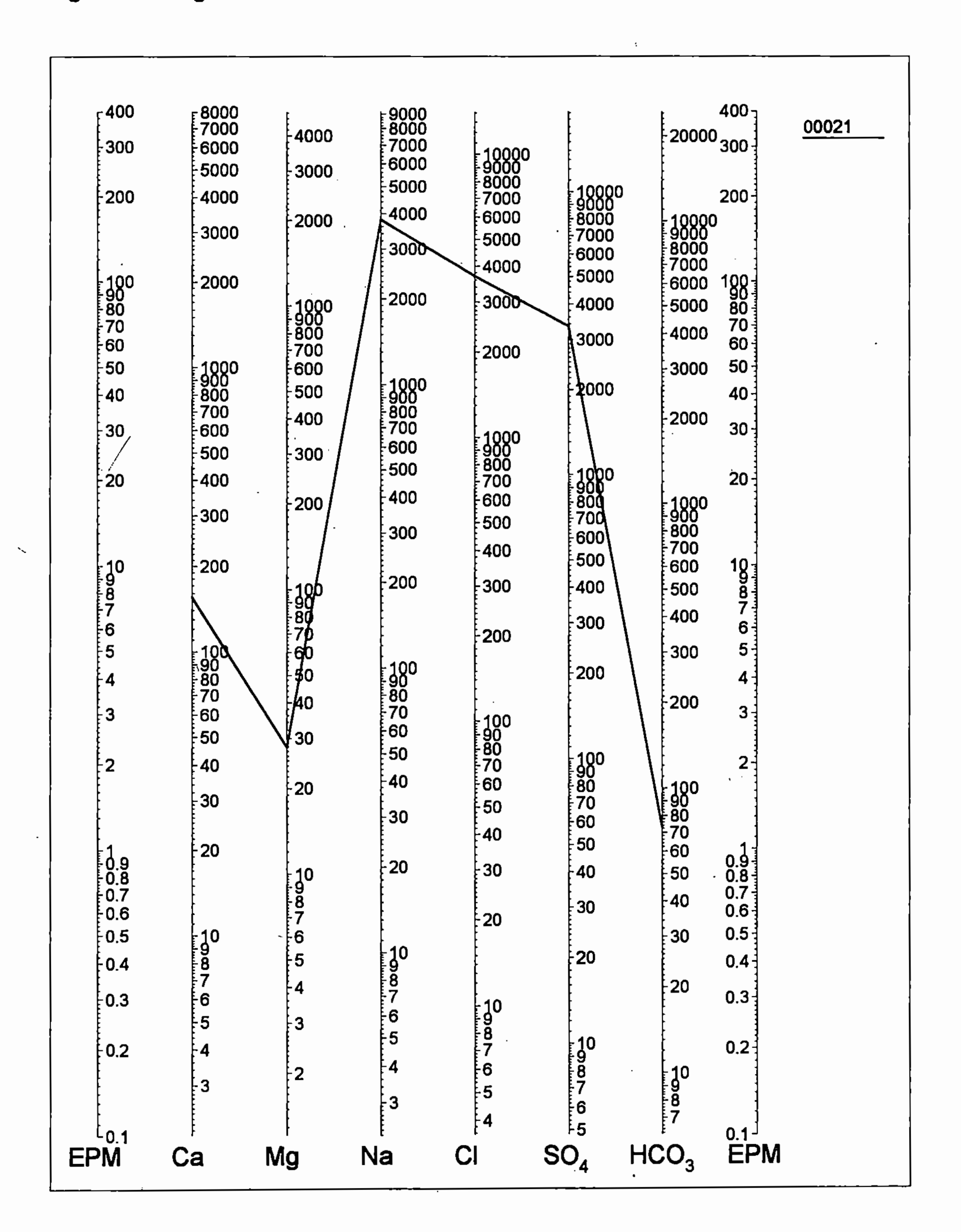


Figura 14. Diagrama de Piper

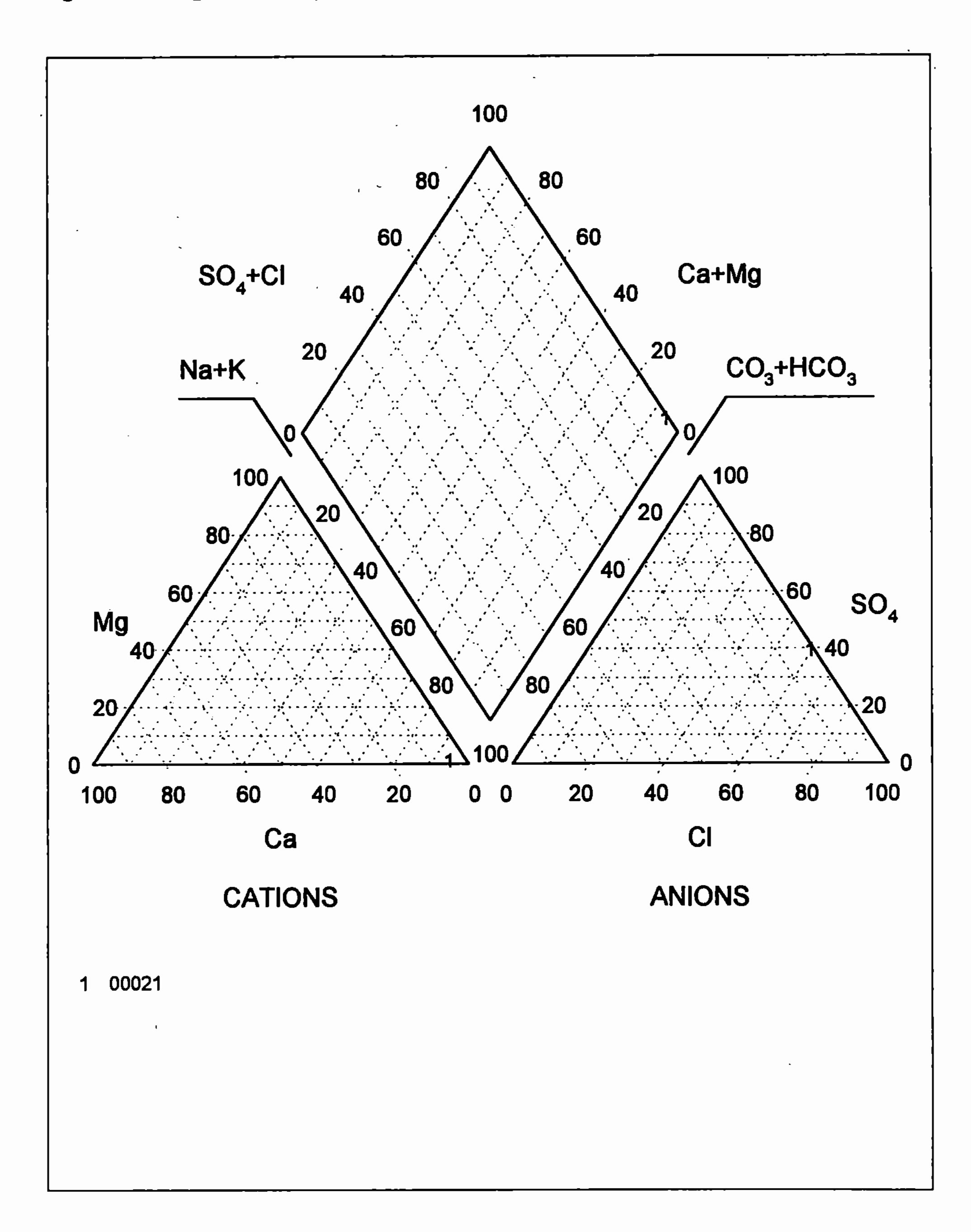


Figura 15. Diagrama de Schöeller

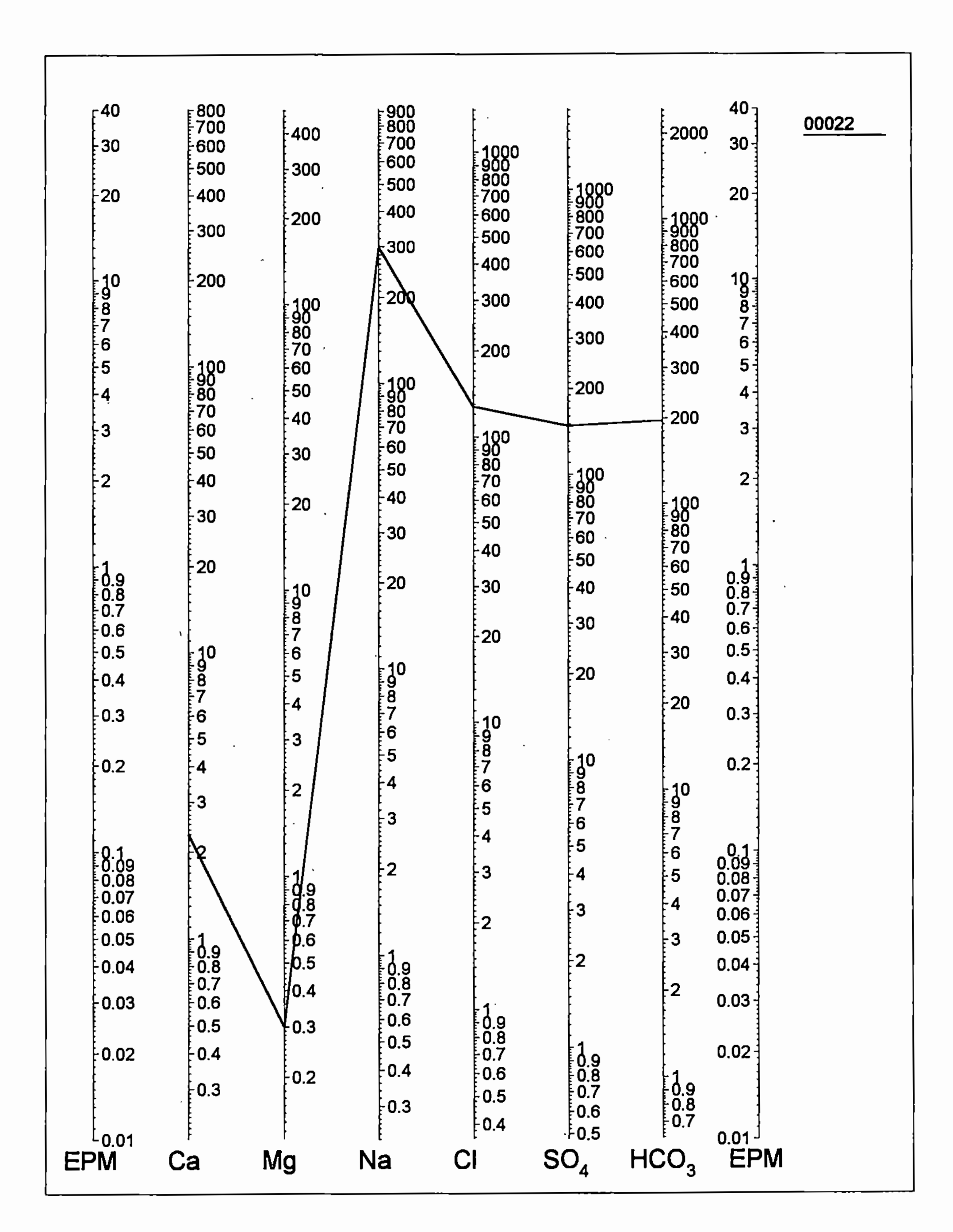


Figura 16. Diagrama de Piper

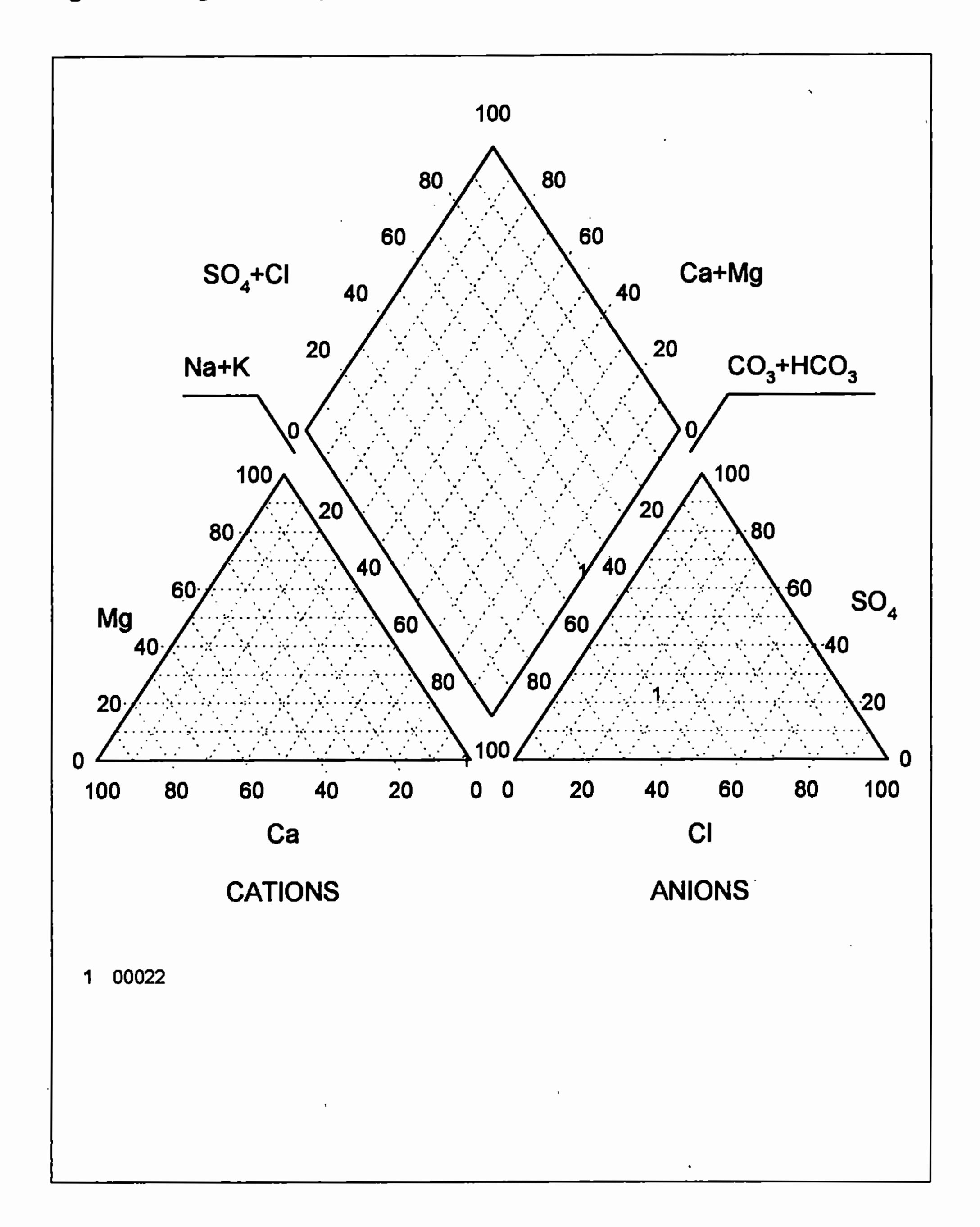


Figura 17. Ajuste a la ley de distribución Normal

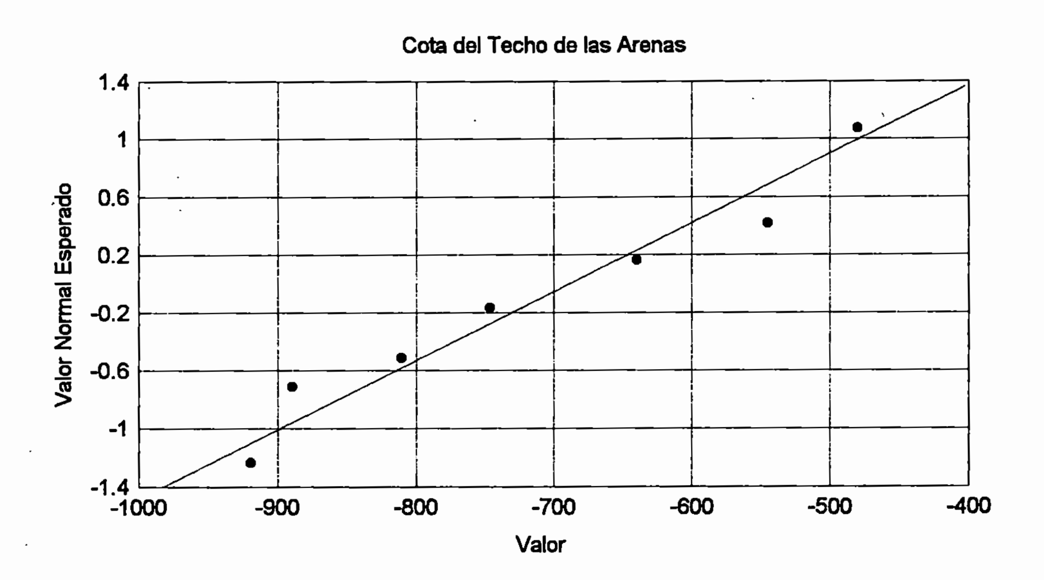


Figura 18. Ajuste a la ley de distribución Normal

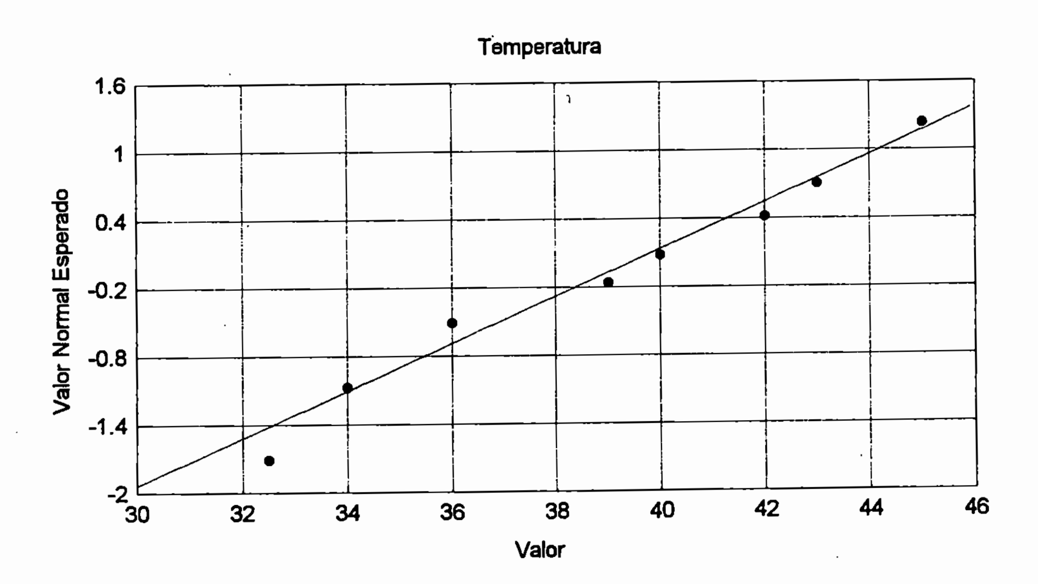


Figura 19. Ajuste a la ley de distribución Normal

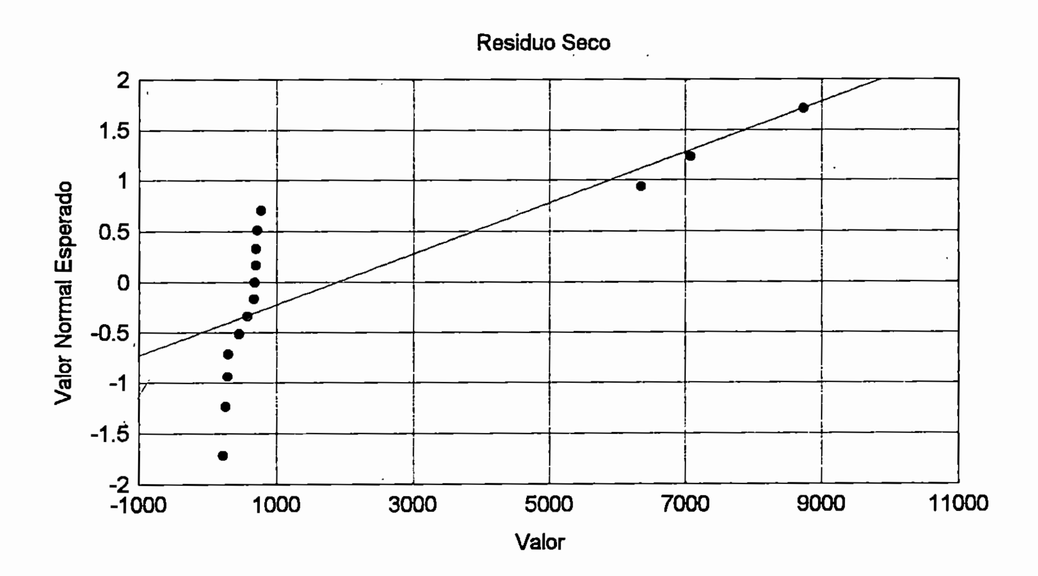


Figura 20. Ajuste a la ley de distribución Normal

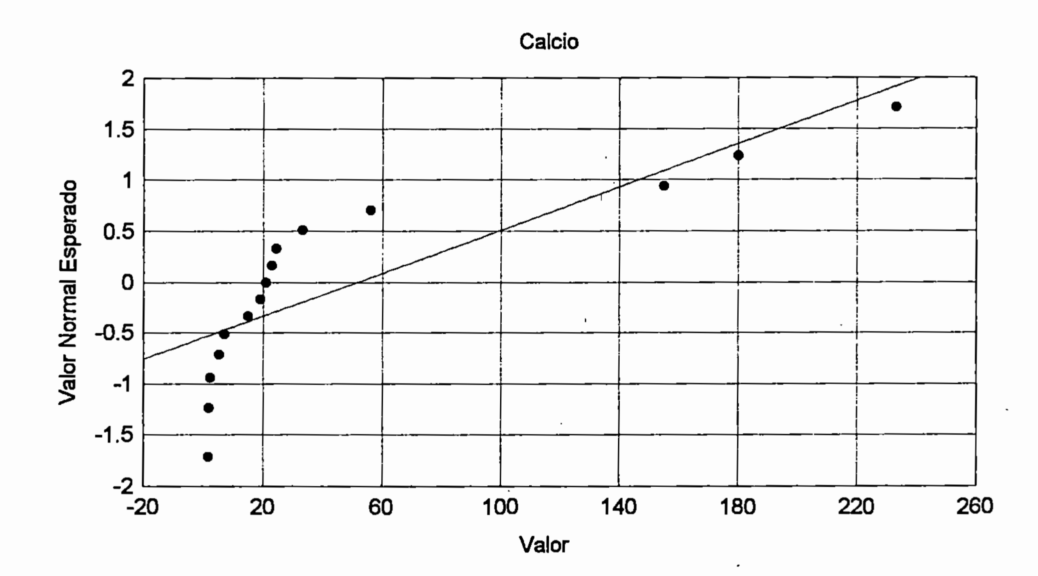


Figura 21. Ajuste a la ley de distribución Normal

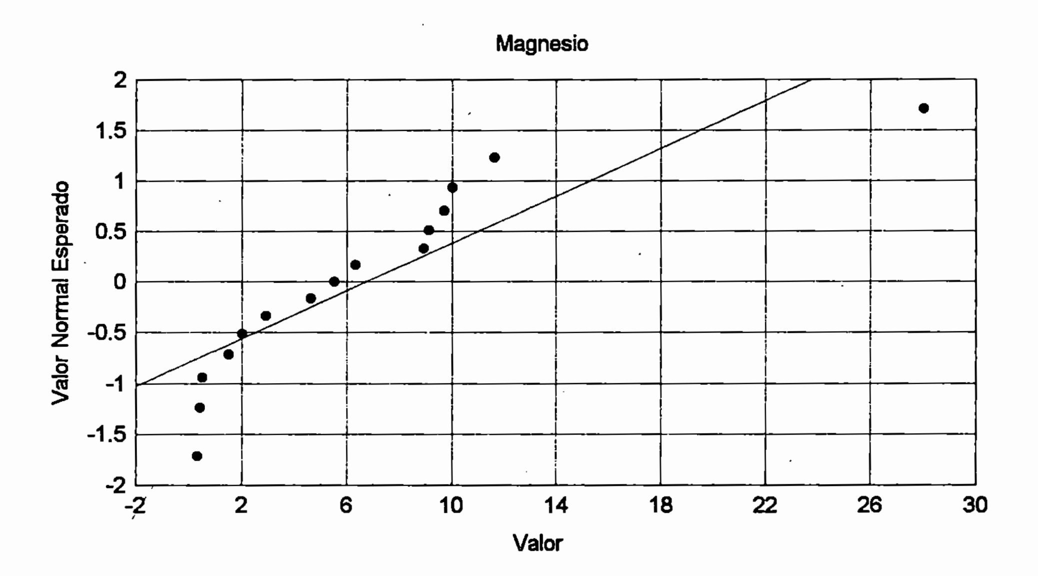


Figura 22. Ajuste a la ley de distribución Normal

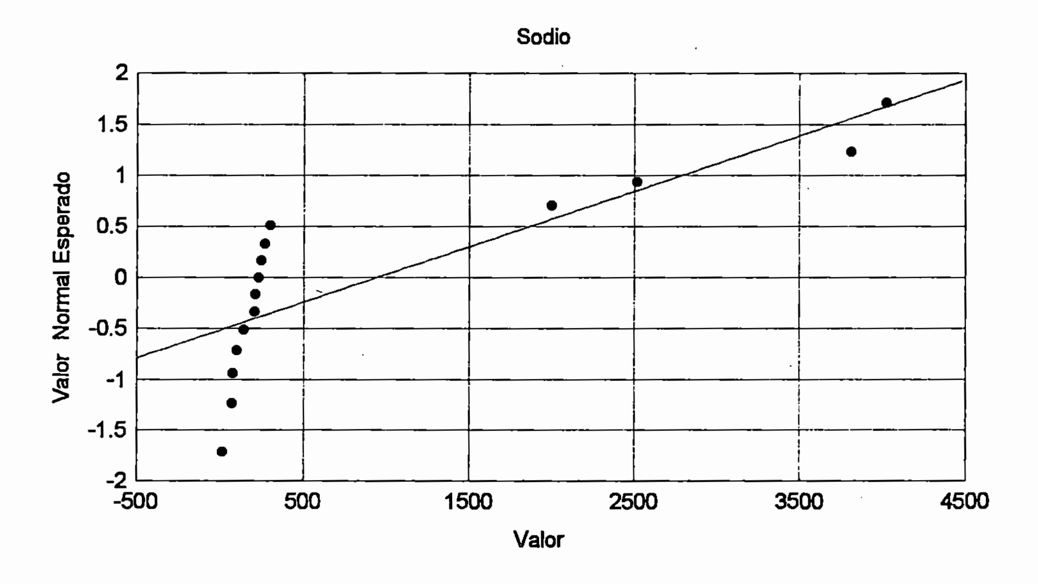


Figura 23. Ajuste a la ley de distribución Normal

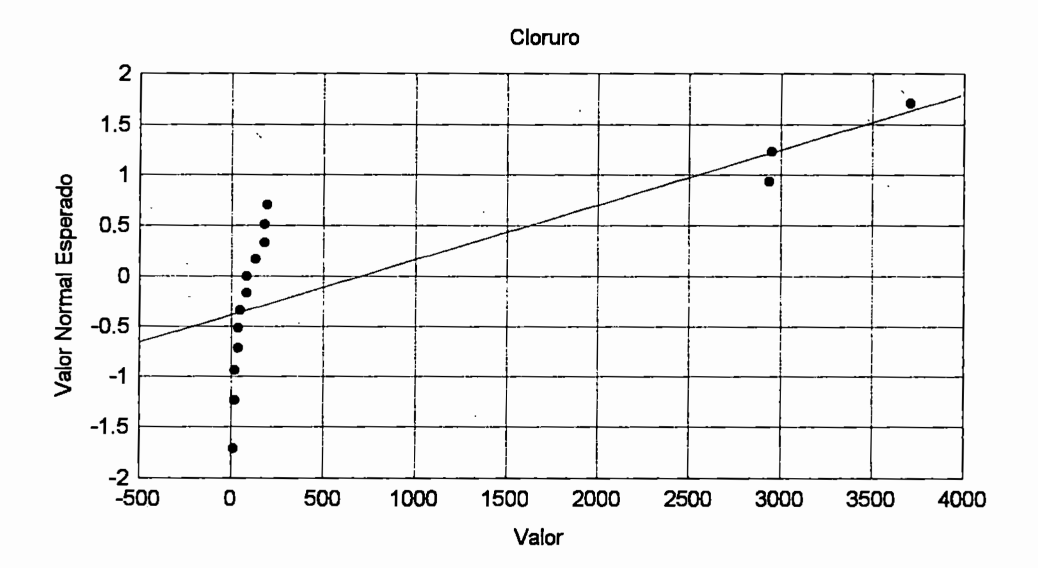


Figura 24. Ajuste a la ley de distribución Normal

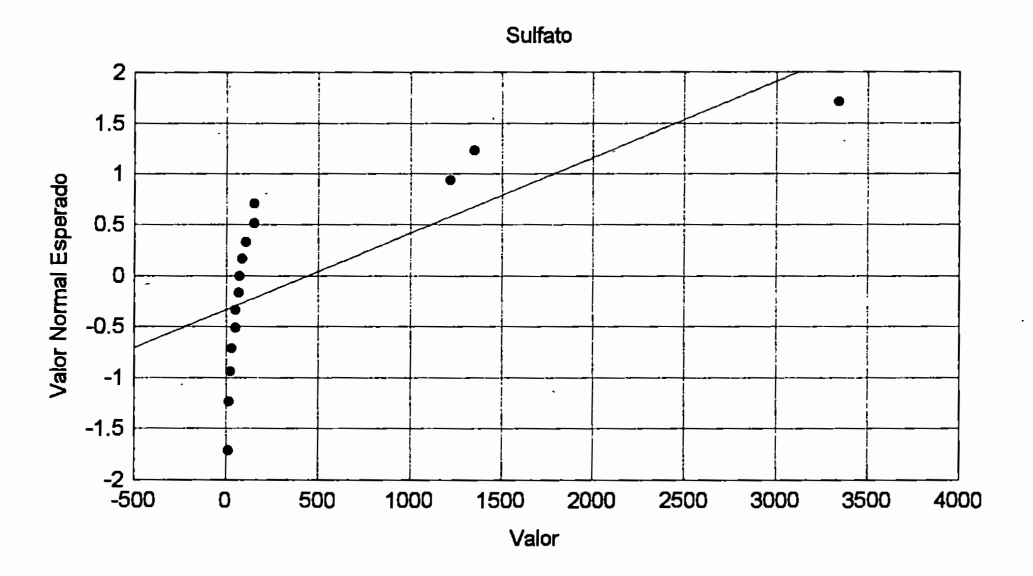


Figura 25. Ajuste a la ley de distribución Normal

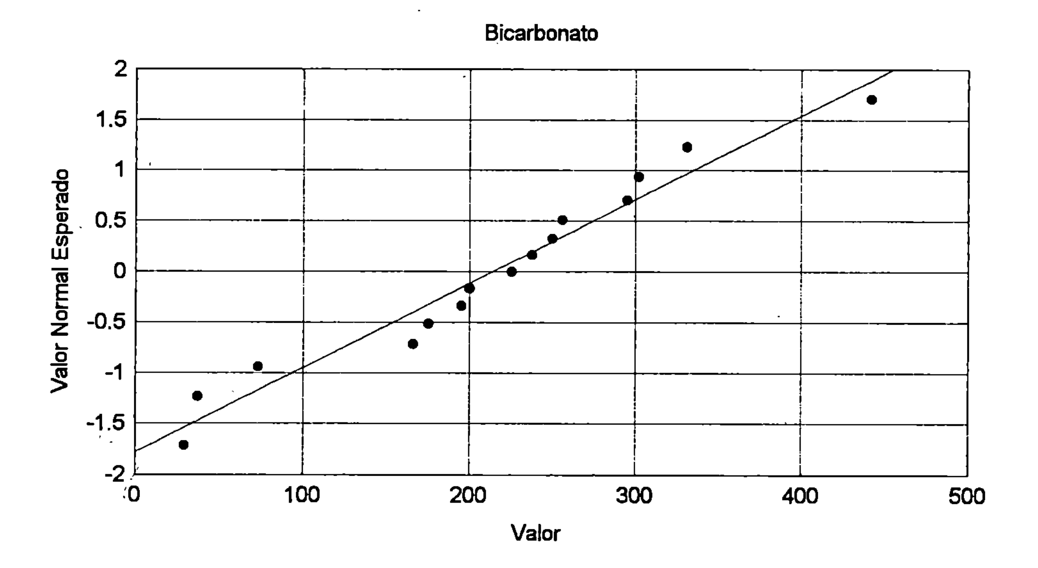


Figura 26. Ajuste a la ley de distribución Normal

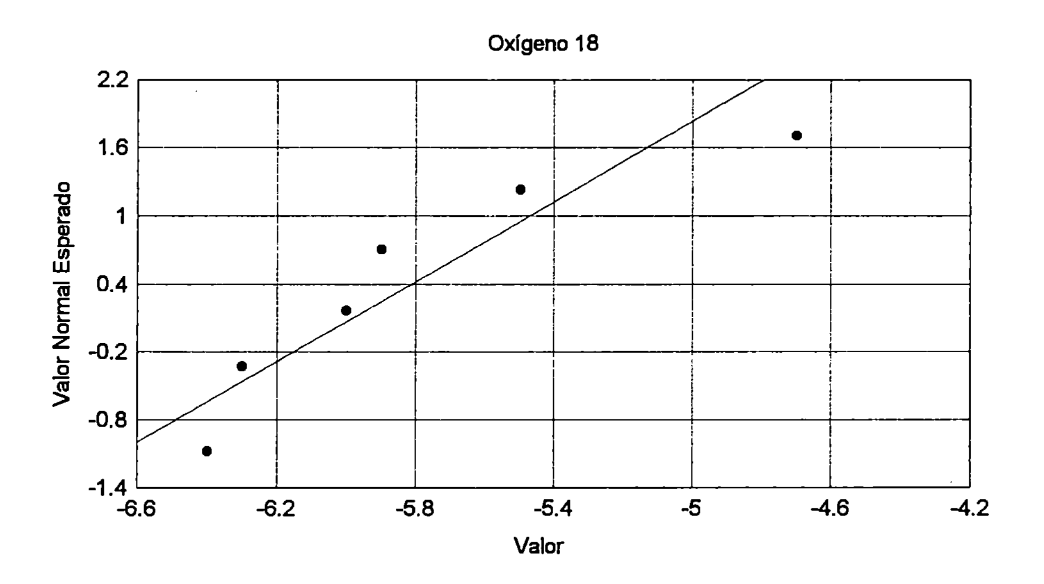
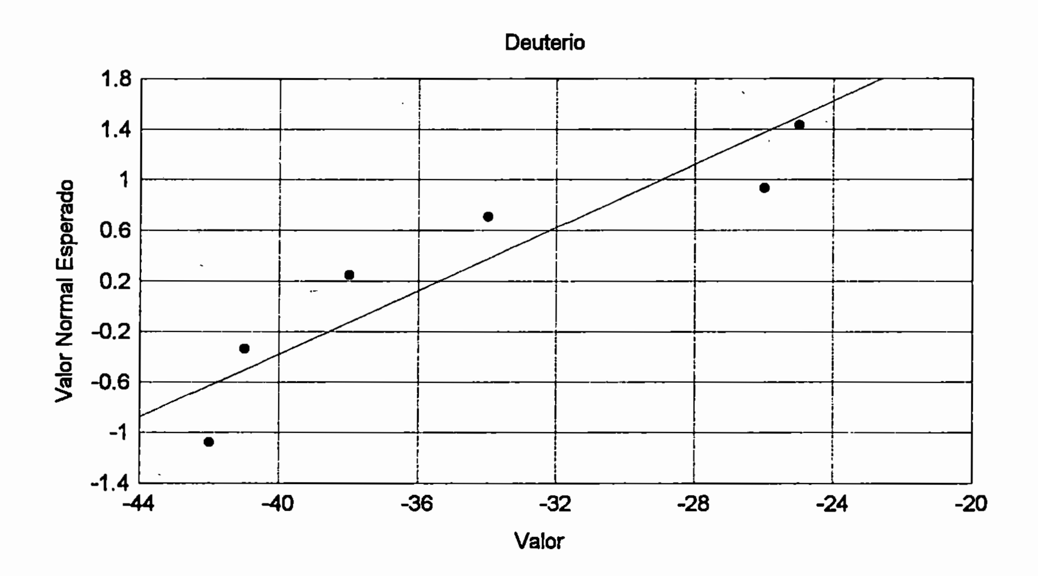


Figura 27. Ajuste a la ley de distribución Normal



Capítulo uruguayo

Marco geológico regional

La Cuenca Norte se desarrolla en el Noreste, Centro-Norte y Noroeste del Uruguay, ocupando un área de aproximadamente 100.000km^2.

Forma parte de la Cuenca Chaco-Paraná, que presenta una extensión de 1.500.000km^2, desarrollándose hacia el Norte en territorio brasileño (Cuenca del Paraná) y al Oeste y Noroeste en la República Argentina y Paraguay (Cuenca del Chaco). Figuras 1 y 2.

La Cuenca Norte se emplaza dentro de un área cratónica, y está constituida por secuencias sedimentarias paleozoicas y mesozoicas, cubiertas por importantes derrames basálticos, alcanzando espesores de hasta 3.500m.

Devónico

La sedimentación en la cuenca comienza con una secuencia de edad Devónico Medio (Veroslavsky, 1995), constituyendo el registro sedimentario más antiguo y representando un ciclo transgresivo-regresivo casi completo. Las formaciones Cerrezuelo, Cordobés, y La Paloma, que constituyen el Grupo Durazno (Bossi, 1966), materializan esta secuencia (C. Aguilar Goso, 1995).

Pérmico

El segundo episodio registrado se inicia en el Pérmico Inferior, con espesos depósitos glaciales y fluvioglaciales, correspondientes a la Formación San Gregorio y correlacionable al Subgrupo Itararé, en Brasil. La sedimentación evoluciona de un ambiente de depositación continental a litoral, constituido por areniscas finas a medias, y conglomerados de la Formación Tres Islas, asimilable a la Formación Río Bonito, en Brasil.

El Pérmico Superior comienza con la depositación, en condiciones litorales a infralitorales, de sedimentos pelíticos grises de la Formación Melo (Ferrando & Andreis, 1986). Está constituida en la base por la Formación Frayle Muerto (Bossi, op. cit.) correlacionable con la Formación Palermo, la que refleja una ingresión del mar Pérmico. Seguidamente la Formación Mangrullo (Bossi, op. cit.), correlativa con la Formación Iratí, representa el máximo de estabilidad de la cuenca. Hacia la cima, se depositan siltitos y areniscas finas correspondientes a la Formación Paso Aguiar (Bossi, op. cit.) correlativa con la Formación Serra Alta-Teresina, de Brasil, que representa un retiro paulatino del mar.

La aparición de areniscas y pelitas rojizas marca el pasaje de condiciones reductoras a oxidantes, y constituyen las formaciones Yaguarí y Buena Vista (Caorsi & Goñi, 1958), correlacionables con las formaciones Río do Rastro y Sanga do Cabral, en Brasil.

Triásico

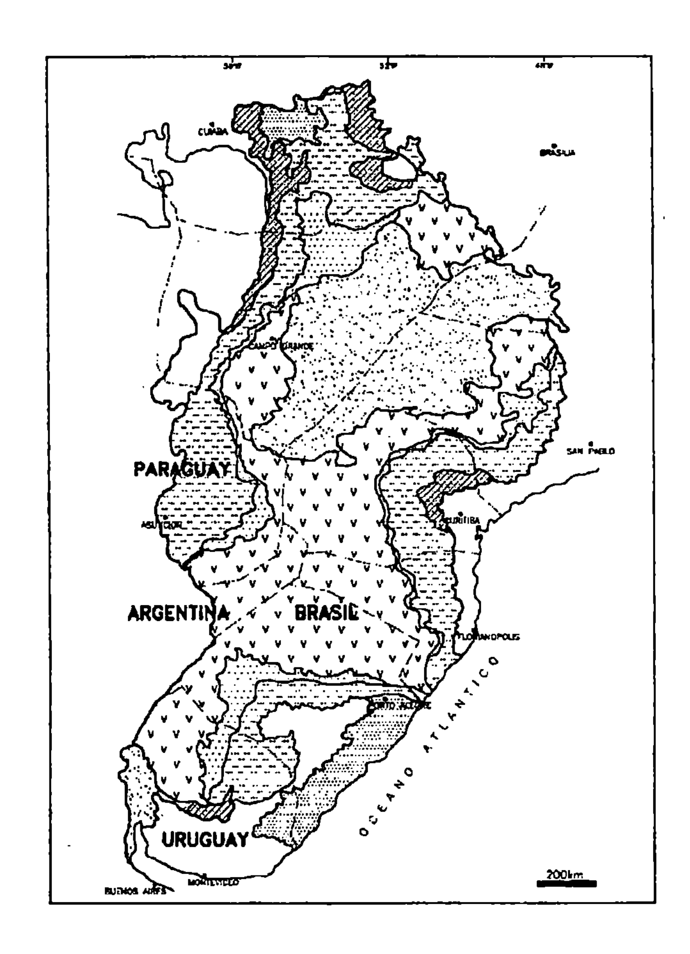
La sedimentación de plataforma somera del Pérmico Superior uruguayo, evoluciona en el Triásico Inferior a depósitos fluviales que definen la Formación Buena Vista. Discordantemente sobre ella se desarrollan areniscas de origen eólico, que luego son invadidas por cuerpos de agua, que culminan nuevamente con sedimentos eólicos, conformando el Grupo Cuchilla Ombú (Ferrando & Montaña, 1987).

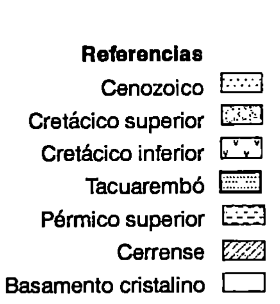
En estas condiciones desérticas, comienza la fracturación del Supercontinente Gondwana que da origen a las fosas tectónicas pericratónicas y a los actuales océanos. A partir del Jurásico Superior hasta el Cretácico, se produce un importante vulcanismo de tipo fisural con dirección EW y NW, representado por extensos derrames basálticos predominantemente tolehíticos de la Formación Arapey.

Figura 1. Mapa de la Cuenca Chaco-Paranense en Sudamérica.
J. Montaño, P. Collazo, 1997. Fuente: Assine et al., no prelo.



Figura 2. Mapa geológico de la Cuenca del Paraná.
J. Montaño, P. Collazo, 1997.





Geología

Columna estratigráfica

Edad	Grupo	Formación	Litología
Cretácico inf.		Fm. Arapey	lavas básicas
Jurásico	Batoví Dorado	Fm. Rivera Fm. Tacuarembó Fm. Cuchilla Ombú	areniscas finas con estrat. cruzada areniscas, limolitas, lutitas areniscas, pelitas blancas y rojizas
Triásico Inf.		Fm. Buena Vista	areniscas blancas y rojizas
Pérmico Sup.		Fm. Yaguarí	arenisca, pelitas rojizas
Pérmico Sup.	Melo	Fm. Paso Aguiar Fm. Mangrullo Fm. Frayle Muerto	siltitos, pelitas lutitas, calcáreos grises a negros siltitos, areniscas finas
Pérmico Medio		Fm. Tres Islas	areniscas, pelitas blancas
Pérmico Inf.		Fm. San Gregorio	diamictitos, pelitas, areniscas
Devónico	Durazno	Fm. La Paloma Fm. Cordobés Fm. Cerrezuelo	siltitos, areniscas finas a gruesas lutitas, areniscas, siltitos areniscas gruesas a finas, pelitas
Precámbrico		Basamento cristalino	granitos, migmatitas, anfibolitas

Figura 3. Carta estratigráfica de la Cuenca Norte en Uruguay.
J. Montaño, P. Collazo, 1997. Fuente: Petrobras.

Tiempo (miles de años)	Cronología: Período	Cronología: Época	Litoestratigráfica: Unidades Gr.	Fm.	Esp. máx. (m)	Litología (NW – SE)	Ambiente
100	Cretácico Terc.						Continental: Eólico, Fluvial, Aluvial
150				Arapey	900		Vulcanismo / Plutonismo
	Jurásico		Batoví Dorado	Rivera	30		Eólico
200			Batoví Dorado	Tacuarembó	400		Eólico
			Batoví Dorado	Cuchilla Ombú	50		Eólico
	Triásico			Buena Vista	50		Fluvio-lacustre/eólico
		Scytsano		Yaguarí	163		Fluvio-lacustre mares
250	Permiano	Neo	Melo	Paso Ag.	213		Fluvio-lacustre mares
		Neo	Melo	Mangrullo	80		Marino: Nerítico
		Eo	Melo	Fray Muerto	160		Restrito / Nerítico
		Eo	Melo	Tres Islas	150		Deltaico
		Eo		San Gregorio	300		Glacial
300	Carbonífero – Pensilvaniano	Steph					
	Carbonífero – Pensilvaniano	West Phaliano					
	Carbonífero – Pensilvaniano	Namuriano					
	Carbonífero – Mississipiano	Viseano					
350	Carbonífero – Mississipiano	Tournasiano					
	Devoniano		Durazno	La Paloma			Marino
	Devoniano		Durazno	Cordobés			Marino
400	Devoniano		Durazno	Cerrizuelo			Fluvial a nerítico
	Silúrico						
450	Ordovícico						
500	Ordovícico						
550	Cámbrico						
	Pre-Cambriano						

Descripción de las unidades litoestratigráficas que constituyen la Cuenca

La secuencia devónica no se describe en el presente trabajo, ya que no fueron encontrados sedimentos de esta secuencia en las perforaciones profundas realizadas en el Norte del país (Tacuarembó, Paso Ullestie, Guichón, etc.).

Formación San Gregorio

Antecedentes

Caorsi y Goñi (op. cit.) designan Formación San Gregorio, a las rocas glaciales correspondientes a la serie Itararé del Sur de Brasil, cuya correlación fue realizada por Falconer en 1930.
Bossi (op. cit.) denomina Formación San Gregorio-Tres Islas, al conjunto de rocas sedimentarias glaciales, fluvioglaciales y limnoglaciales.
A partir de 1976, y como resultado de estudios realizados por la DINAMIGE e investigadores extranjeros, la Formación San Gregorio es separada como una unidad litoestratigráfica independiente (Spoturno, 1982 en Aguilar Goso, 1995).
Bossi & Navarro (1988) designan grupo San Gregorio-Tres Islas antes denominado Formación San Gregorio-Tres Islas.
Goso & De Santa Ana (1986) y De Santa Ana (1989) definen dos unidades para esta formación. Una facies proximal integrada por depósitos predominantemente psefíticos y secundariamente ritmitos psamo-pelíticos y una facies distal integrada por fangolitas, ritmitos, diamictitas finas grises y pelitas negras y castañas con intercalaciones arenosas.

Litología

Según C. Aguilar Goso (op. cit.), la Formación San Gregorio está litológicamente constituida por diamictitos gris-claro, clasto y matriz soportado, con bloques redondeados a subangulosos polimícticos; areniscas medias a finas, blanco-amarillentas, cuarzosas, bien seleccionadas, con gradación normal, laminación cruzada tipo "ripple" y macizo; ritmitos, gris-claro, con laminación paralela; arcillitas negras, laminadas con abundante contenido en materia orgánica.

Estructuras sedimentarias

En las rocas arenosas se observan laminaciones horizontales, estratificación cruzada, formas de lecho con ondulaciones asimétricas y laminación cruzada tipo "ripple-drift" (Aguilar Goso, op. cit.).

Ambiente de sedimentación

Según De Santa Ana (op. cit.), los términos gruesos de la facies proximal responderían a un ambiente glacial y fluvioglacial de montañas y valles y los términos finos estarían asociados a episodios glacio-lacustres y glacio-marinos. Los sedimentos de la facies distal representan depósitos transicionales glacio-marinos y prodeltaicos con términos marinos. Los depósitos de la facies distal sustituyen la facies proximal lateralmente.
Ferrando & Andreis (op. cit.) y Ferrando & Montaña (op. cit.), designan un ambiente glacio-marino, asociado a corrientes de densidad en condiciones subacuosas, específicamente en ambiente lacustre.
Andreis (1991) propone para esta formación, un ambiente glacio-marino, siendo los procesos sedimentarios dominantes los flujos gravitacionales de sedimentos sub-acuosos.
Según Aguilar Goso (op. cit.) esta formación fue depositada bajo una gran influencia glacial, donde se intercalan flujos gravitacionales de sedimentos y facies constructivas.

Edad

Pérmico Inferior.

Relaciones de contacto

La Formación San Gregorio se apoya en forma directa sobre el basamento cristalino o sobre los sedimentos devónicos. El contacto con la formación suprayacente es gradual, pasando de areniscas muy finas a areniscas gruesas, hacia el tope con intercalaciones de sedimentos más finos negros con gran contenido de materia orgánica vegetal. (Aguilar Goso, op. cit.).

Espesor de la formación

Los espesores máximos se encontraron en las perforaciones: Salsipuedes en el departamento de Tacuarembó con una potencia de 295m, Guichón en el departamento de Paysandú con 290m y Paso Ullestie en el departamento de Río Negro con 254m. (Aguilar Goso & De Santa Ana, op. cit.).
La potencia aumenta hacia el Suroeste independientemente de la tectónica posterior y se adelgaza hacia el Noreste.

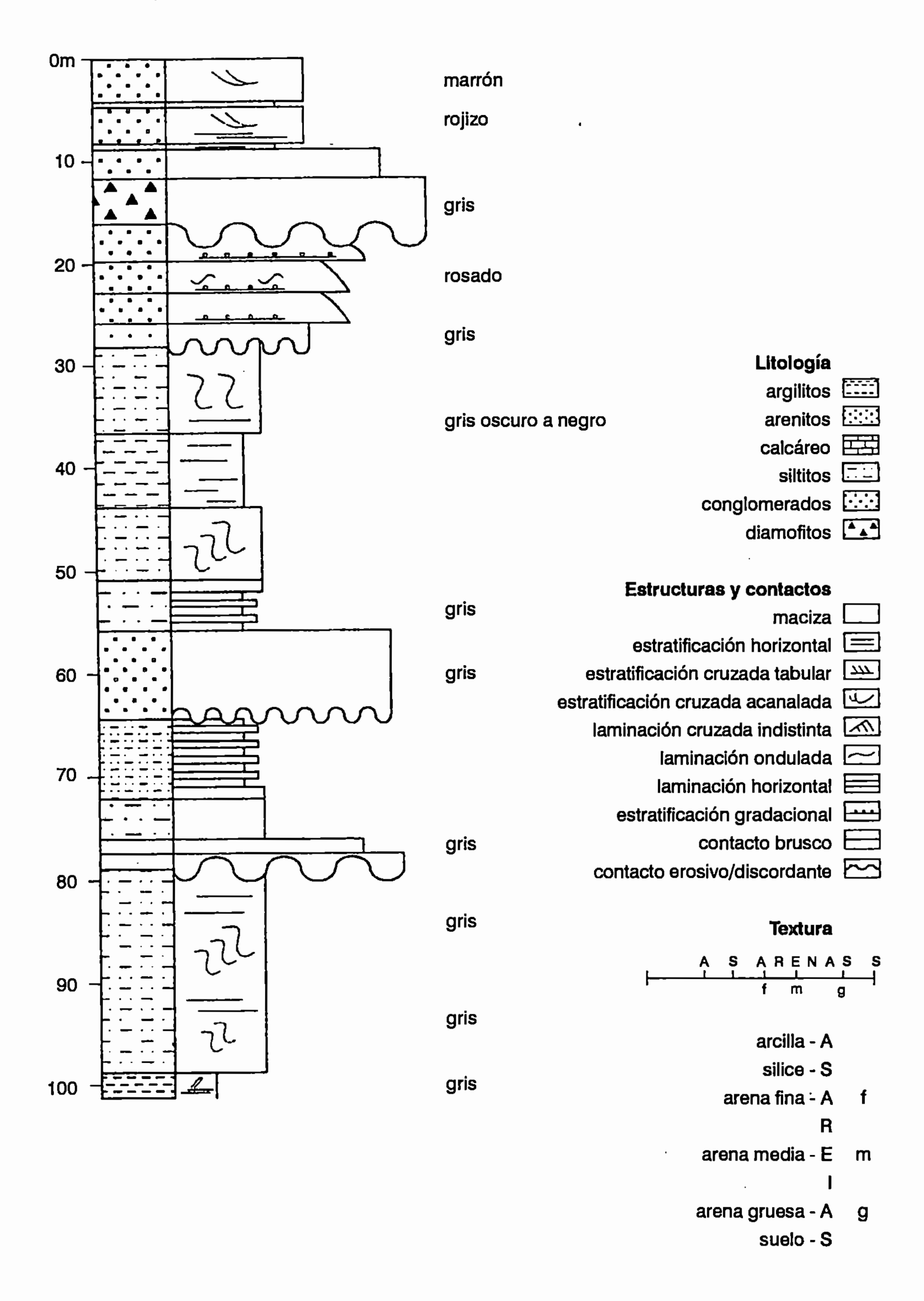
Extensión y área tipo

Aflora en los departamentos de Durazno, Cerro Largo, Tacuarembó, Rivera, Río Negro y Soriano. En profundidad abarca los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú y Río Negro, la mitad occidental del departamento de Tacuarembó y la casi totalidad del de Durazno.
Caorsi y Goñi (op. cit.) tomaron como localidad tipo a la ciudad de San Gregorio de Polanco, Departamento de Tacuarembó. Bossi (op. cit.) le asignó un carácter formacional, y describió la sección tipo en la barranca de la margen izquierda del Río Negro, frente a la localidad de San Gregorio que de base a cima es:

- 0m a 2,80m, tillitas de matriz areno-arcillosa de tonalidad bordó, con grava angulosa de hasta un centímetro de arista.
- 2,80m a 5,80m, tillitas con matriz arenosa y bloques suspendidos en su masa de hasta 10cm de diámetro; dentro de estas tillitas aparecen niveles de arcosa de pocos centímetros de espesor.
- 5,80m a 9,30m, areniscas finas y gruesas de color rojo, marrón y amarillo muy feldespáticas y con estratificación bien marcada.
- en la parte superior del perfil, ya a unos 300m de distancia de la orilla del río, aparece otro nivel de tillita con grava fina suspendida en una matriz arcillo-arenosa de color violado.

A continuación, se presenta el Perfil Litológico de la Formación San Gregorio, (Aguilar Goso, op. cit.). Figura 4.

Figura 4. Perfil litológico de la Formación San Gregorio.
J. Montaño; P. Collazo, 1997.



Antecedentes

Falconer (1930) describe unas areniscas con tonalidades grisáceas, amarillentas, marrones o rojizas de grano fino predominantemente, con términos más groseros, que denomina Grupo Río Bonito, que posteriormente Caorsi y Goñi (op. cit.) lo sustituyen por "Areniscas de Tres Islas". Bossi (op. cit.) no describe esta formación en forma independiente e incluye a las areniscas de Tres Islas en la Formación San Gregorio.
El relevamiento realizado por Elizalde (1970, en Bossi y Navarro, 1988), en el NE del departamento de Cerro Largo, permitió definir esta formación.
A partir de Ferrando & Andreis (1982) la Formación Tres Islas se considera como una unidad independiente.

Litología

Según Bossi & Navarro (op. cit.) está integrada principalmente por areniscas finas a gruesas en proporción variable, con menor cantidad de areniscas conglomerádicas, limolitas y lutitas.
La presencia de óxido de hierro da a las areniscas tonalidades amarillentas, rojas, pardas y rosadas.
Las limolitas presentan estratificación paralela y se encuentran como potentes capas intercaladas en las areniscas. Las lutitas, siempre de color blanco, se encuentran como lentes de poca potencia dentro de las areniscas.
Se presentan a continuación los resultados del análisis granulométrico realizado a partir de 2 muestras de areniscas finas, 1 muestra de arenisca gruesa bien seleccionada, 3 muestras de limolitas y 1 muestra de lodolita. (Elizalde, op. cit.).

Fracción (mm)	Areniscas finas %		Areniscas gruesas %	limolitas %			lodolitas %
Mayor a 1,5	0	0	1	0	0	0	0
1,50 - 1,00	0	0	30	0	0	0	2
1,00 - 0,50	0	0	49	0	0	0	0
0,50 - 0,25	0	0	12	0	0	0	0
0,25 - 0,12	68	69	2	0	0	0	13
0,12 - 0,06	10	7	0	1	2	9	27
0,060 - 0,030	4	6	0	37	31	39	8
0,030 - 0,015	0	1	0	21	19	15	8
0,015 - 0,008	0	1	0	9	10	2	6
0,008 - 0,004	2	2	0	1	1	0	5
0,004 - 0,002	3	2	0	6	10	8	9
Menor a 0,002	14	13	7	26	27	23	23
Md (mm)	0,17	0,14	0,76	0,02	0,02	0,03	0,03
So	1,50	1,60	1,40	-	-	5,10	7,10
Sk	0,56	0,57	1,00	-	-	0,14	0,18

Las areniscas predominantes son finas a medias, muy bien seleccionadas, los granos están compuestos principalmente por cuarzo, redondeados a subredondeados. Más del 40% de las descripciones de campo corresponden a esta litología.

Estructuras sedimentarias

En la parte superior de las secuencias son frecuentes las estructuras entrecruzadas que determinan escarpas características en las áreas de afloramiento. Presenta, además, estratos masivos y de estratificación paralela.

Ambiente de depositación

Bossi (op. cit.) le atribuye un origen fluvioglacial. Según Elizalde (en Bossi & Navarro, op. cit.) la depositación se realizó a partir de un agente de transporte fluido, acuoso,

con variable competencia y con alta capacidad de selección granulométrica.
Da Silva (1984) a partir de datos palinológicos, asigna un ambiente de sedimentación fluvial-deltaico, incluyendo episodios torrenciales meandreantes, próximo-deltaicos y deltaicos.
L. Ferrando y J. Montaña (op. cit.) sugieren un ambiente de sedimentación fluvial hacia el tope; deltaico en la parte central y fluvial entrelazado pasando a meandriforme, en la parte basal.

Edad

Pérmico Medio.

Relaciones de contacto

La Formación Tres Islas se apoya de forma concordante sobre la Formación San Gregorio y en discordancia sobre rocas del basamento. (Elizalde, en Bossi & Navarro, op. cit).

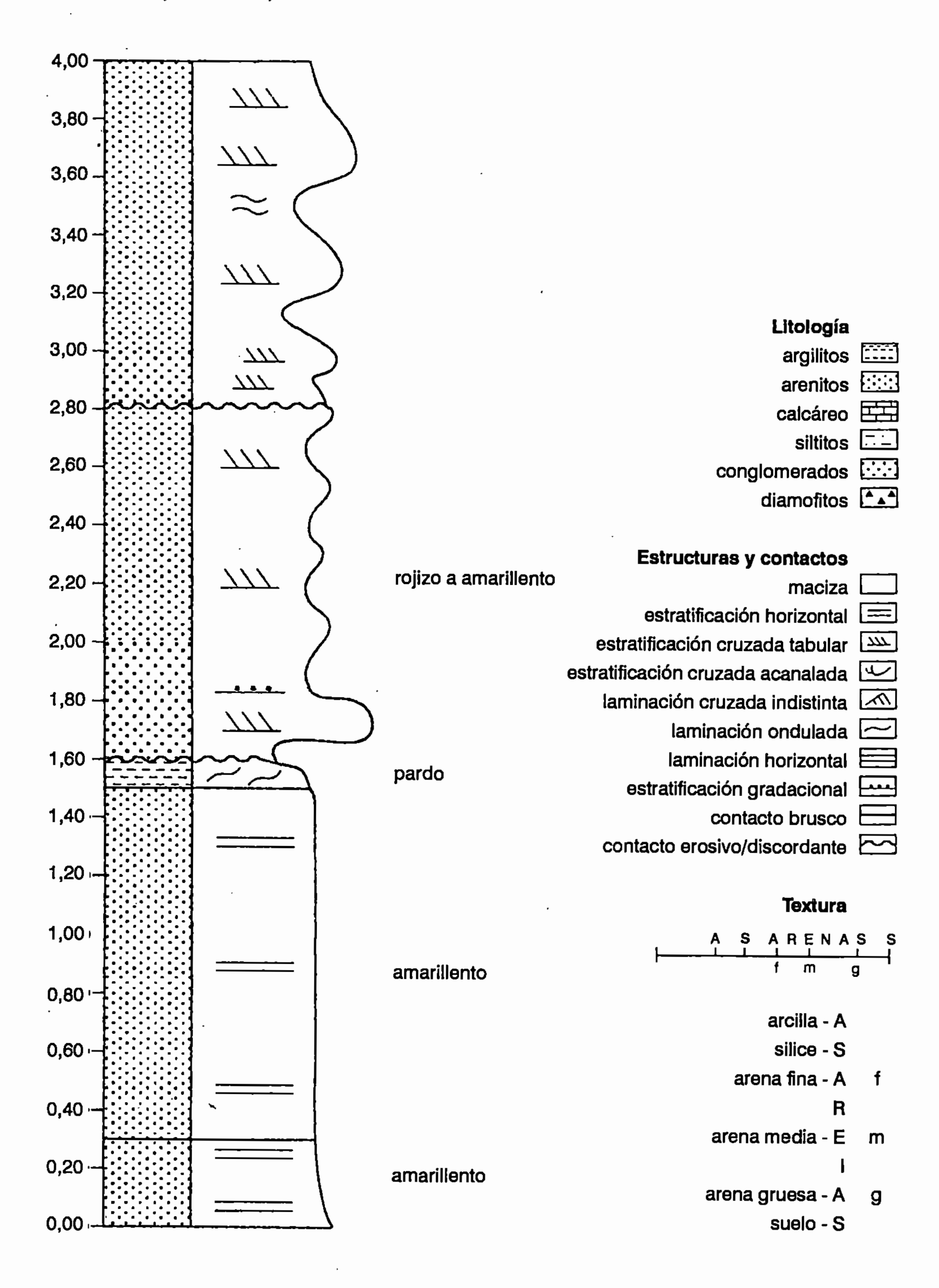
Espesores de la unidad

Esta formación no superaría los 150m descriptos por Elizalde (en Bossi & Navarro, op. cit) en la perforación "El Águila".

Extensión y área tipo

Caorsi & Goñi (op. cit.) y Bossi (op. cit.) admitieron que se desarrolla en toda la cuenca, pero la descripción detallada realizada por los autores de los sondeos de Paso Ullestie, Las Toscas y La Puente, demuestran su ausencia en los mismos. (Ferrando, et al., op. cit.).
Según Ferrando et al. (op. cit.) la Formación Tres Islas se desarrollaría básicamente en el Este y Sureste de la cuenca, tendiendo a desaparecer hacia las partes centrales de la misma donde ya existían ambientes de plataforma somera.

Figura 5. Perfil Litológico de la Formación Tres Islas.
J. Montaño, P. Collazo, 1997.



Aflora en Durazno, Cerro Largo y Tacuarembó. En profundidad se encuentra en los departamentos de Durazno, Tacuarembó y Cerro Largo.
Caorsi & Goñi (op. cit.) tomaron como localidad tipo los alrededores del pueblo Tres Islas, ubicado en el departamento de Cerro Largo, a unos 20km al Oeste de la ruta nacional Nro. 7 entre las localidades de Cerro de las Cuentas y Frayle Muerto. Ver perfil litológico de la Formación Tres Islas, (Bossi & Navarro, op. cit.). Figura 5.

Grupo Melo

Antecedentes

La designación de Formación Melo fue propuesta por Ferrando y Andreis (op.cit.) para sustituir el término "Sedimentos Pelíticos Grises"de Elizalde (1970).
Mackinnon y De Santa Ana (1982), en base a estudios de perforaciones, distinguen diversas unidades dentro de esta formación: Frayle Muerto, Mangrullo y Paso Aguiar, propuestos por Bossi (op. cit.). Figura 6.

Litología

La Formación Melo está constituida por limolitas, con tonalidades características de un ambiente reductor, predominantemente grises.
A continuación se presentan los resultados del análisis granulométrico realizado por Elizalde et al. (op. cit.) para la región Noreste del departamento de Cerro Largo, limitado a granulometrías de las limolitas (en Bossi, op. cit.).

Fracción (mm)	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %
1,000 - 0,500	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,500 - 0,250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,250 - 0,120	1,00	0,00	1,00	0,00	2,00
0,120 - 0,060	4,00	3,00	7,00	5,00	9,00
0,060 - 0,030	33,0	17,0	16,0	11,0	24,0
0,030 - 0,015	21,0	20,0	18,0	10,0	17,0
0,015 - 0,008	8,00	11,0	9,00	13,0	8,00
0,008 - 0,004	1,00	5,00	7,00	15,0	2,00
0,004 - 0,002	7,00	36,0	36,0	24,0	0,00
menor a 0,002	26,0	8,00	6,00	23,0	39,0
Md (mm)	0,02	0,009	0,009	0,005	0,02
So	-	3,350	3,310	2,800	-
Sk	-	0,920	1,000	1,130	-

Ambiente de depositación

Para las litologías de la Formación Melo, Ferrando & Andreis (op. cit.) sugieren la existencia de cuerpos de agua extensos y poco profundos durante su depositación.
Las tonalidades verdosas hasta casi negras, así como concreciones de pirita, indican la existencia temporaria de condiciones euxínicas, de aguas estancadas y poco oxigenadas.

Edad

Pérmico Medio.

Relaciones de contacto

La Formación Melo se apoya de forma concordante con las sedimentitas anteriores. Según Ferrando & Montaña (op. cit.) se podría hablar de un pasaje gradual a partir de San Gregorio, en las partes centrales de la cuenca (perfo-

ración Las Toscas) y un pasaje lateral con Tres Islas situándose en las áreas intermedias.

Espesor de la unidad

Las potencias máximas fueron encontradas en el departamento de Artigas, perforación Artigas con 401m de espesor, en el departamento de Tacuarembó en la perforación Mazangano con un espesor de 350m y en el departamento de Salto en el sondeo Paso Las Piedras con 339m.

Extensión y área tipo

Se encuentra aflorando en los departamentos de Cerro Largo y Tacuarembó, como una faja continua, separada por depósitos más jóvenes. En profundidad esta formación abarca los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Tacuarembó, Cerro Largo y Río Negro.
De acuerdo a lo ya enunciado, los tres miembros que integran esta Unidad de base a tope son:

Formación Frayle Muerto

Antecedentes

A partir de relevamientos preliminares de Falconer (op. cit.) con el nombre de "esquistos de Palermo" y el posterior cambio de nomenclatura de Caorsi y Goñi (op. cit.) por la de "lutitas arenosas y calizas de Frayle Muerto", Bossi (op. cit.) pudo separarla como formación.
Falconer (op. cit.) la define como lutitas arenosas grises, laminadas. Caorsi y Goñi (op. cit.) identifica la unidad prácticamente igual a Falconer (op. cit.).
Posteriormente Bossi (op. cit.) observa que la base está representada por limolitas grises sin estratificación visible, que hacia la cima pasan a lutitas con microestratificación cruzada bien definida.

Litología

Constituida por siltitos y arcillitas grisáceas con laminación horizontal o levemente ondulada y raras intercalaciones

de capas decimétricas de areniscas estratificadas. (ANCAP, 1993 en Aguilar Goso, op. cit.)

Estructuras sedimentarias

La estratificación que se desarrolla en esta formación es plana y entrecruzada.

Ambiente de depositación

Elizalde et al. (op. cit.) concluye para todos los sedimentos pelíticos grises que el transporte se realizó por corrientes de agua suave, de escasa competencia. (Bossi & Navarro,op. cit.). El medio ambiente de depositación es en aguas tranquilas de reducida movilidad.
Según Da Silva (op. cit.) el ambiente de depositación es subacuático de facies litorales a infralitorales, con presencia de dinámica de oleaje en la parte inferior de la formación evolucionando hacia la cima a estructuras de sedimentación de aguas calmas.

Relaciones de contacto

El pasaje de areniscas de Tres Islas a areniscas y siltitos de la Formación Frayle Muerto es gradual, con enriquecimiento en mica y materia orgánica. El pasaje a la Formación Mangrullo es progresivo, con enriquecimiento en carbonatos. (Hommer, 1982).

Espesores de la unidad

Según Preciozzi et al. (1985) presenta espesores máximos en la perforación Las Toscas, con un valor de 160m.

Extensión y área tipo

La extensión de esta unidad, tanto en los afloramientos superficiales como en profundidad, coincide con la mencionada para la Formación Melo.
Aunque toma el nombre de la ciudad de Frayle Muerto en

el departamento de Cerro Largo, no se ha reconocido una sección tipo.

Formación Mangrullo

Antecedentes

Falconer (op. cit.) es el primero en relevarla y la correlaciona con la Formación Iraty de Brasil. Caorsi y Goñi (op. cit.) denominan esta unidad como "lutitas bituminosas de Mangrullo".

Varios autores, Bossi (op. cit.), asignan un carácter formacional a esta unidad mientras que Elizalde et al. (op. cit.) no la consideran como unidad independiente.

Después de los estudios de Mackinnon & De Santa Ana (op. cit.) y de Da Silva (op. cit.), se propone considerarla como unidad independiente.

Litología

Según Mackinnon & De Santa Ana (op. cit.) en Bossi & Navarro, (op. cit.), está representada por dos ciclos deposicionales, donde cada secuencia está compuesta de base a cima por:

• Siltitas micáceas en la base de cada ciclo de color variable entre gris y negro, pudiendo ser masivas o laminadas. Las rocas masivas son netamente dominantes (limolitas). La potencia varía entre 8 y 16m.

• Calizas y lutitas calcáreas. Las calizas son de color gris claro, de estructura masiva, láminas plano-paralelas o lenticulares. La potencia de estas capas varía entre 5 y 9m.

• Lutitas pirobituminosas en la cima. Son rocas limoarcillosas ricas en materia orgánica, de color gris oscuro a negro, bien litificadas y con notoria estratificación lenticular o plano paralela. Presentan potencia variable entre 2 y 6m. Mackinnon & De Santa Ana (op. cit.).

Estructuras sedimentarias

Estratificación dominantemente plano-paralela, lenticular.

Ambiente de depositación

Falconer (op. cit.) supuso la sedimentación en lagunas de escasa profundidad (en Bossi & Navarro, op. cit.). La sedimentación es característica de un ambiente fuertemente reductor y con etapas de agua salada.

Relaciones de contacto

El pasaje de lutitas bituminosas a siltitos y areniscas de la Formación Paso Aguiar es progresivo.

Espesores de la unidad

Según Preciozzi et al. (op. cit.), el espesor máximo de esta unidad en la cuenca alcanza 80m en la perforación El Águila.

Extensión y área tipo

Las zonas de afloramiento son las de Cerro Largo, Rivera y Tacuarembó. En profundidad en los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Tacuarembó, Cerro Largo, Río Negro. No se ha designado la sección tipo para esta unidad.

Formación Paso Aguiar

Antecedentes

La denominación de Paso Aguiar fue propuesta por Caorsi y Goñi (op. cit.), pero esta unidad ya había sido distinguida por Falconer en 1930 (op. cit.). Bossi (op. cit.) le asigna rango de formación.
Mackinnon & De Santa Ana (op. cit.) crean el miembro Paso Aguiar para designar los sedimentos pelíticos grises, que se desarrollan en la cima de las lutitas pirobituminosas y el comienzo de los colores de oxidación.

Litología

Está constituida por areniscas finas, rocas limosas y lutitas en proporciones variables según la posición estratigráfica.

Hacia la cima predominarían las siltitas arenosas, mientras que hacia la base se harían más arcillosas. Las tonalidades varían de verde grisáceo al gris claro. Mackinnon & De Santa Ana (op. cit.).

Estructuras sedimentarias

La estratificación es dominantemente laminar paralela.

Ambiente de depositación

Según Bossi (op. cit.), las condiciones de sedimentación corresponden a un ambiente marino poco profundo, con constante movimiento del fondo.

Relaciones de contacto

El pasaje a la Formación Yaguarí es gradual, colorimétrico. (Hommer. op. cit.).

Espesores de la unidad

Según Bossi (op. cit.), en la Perforación Mazangano, alcanza una potencia de 213m.

Extensión y área tipo

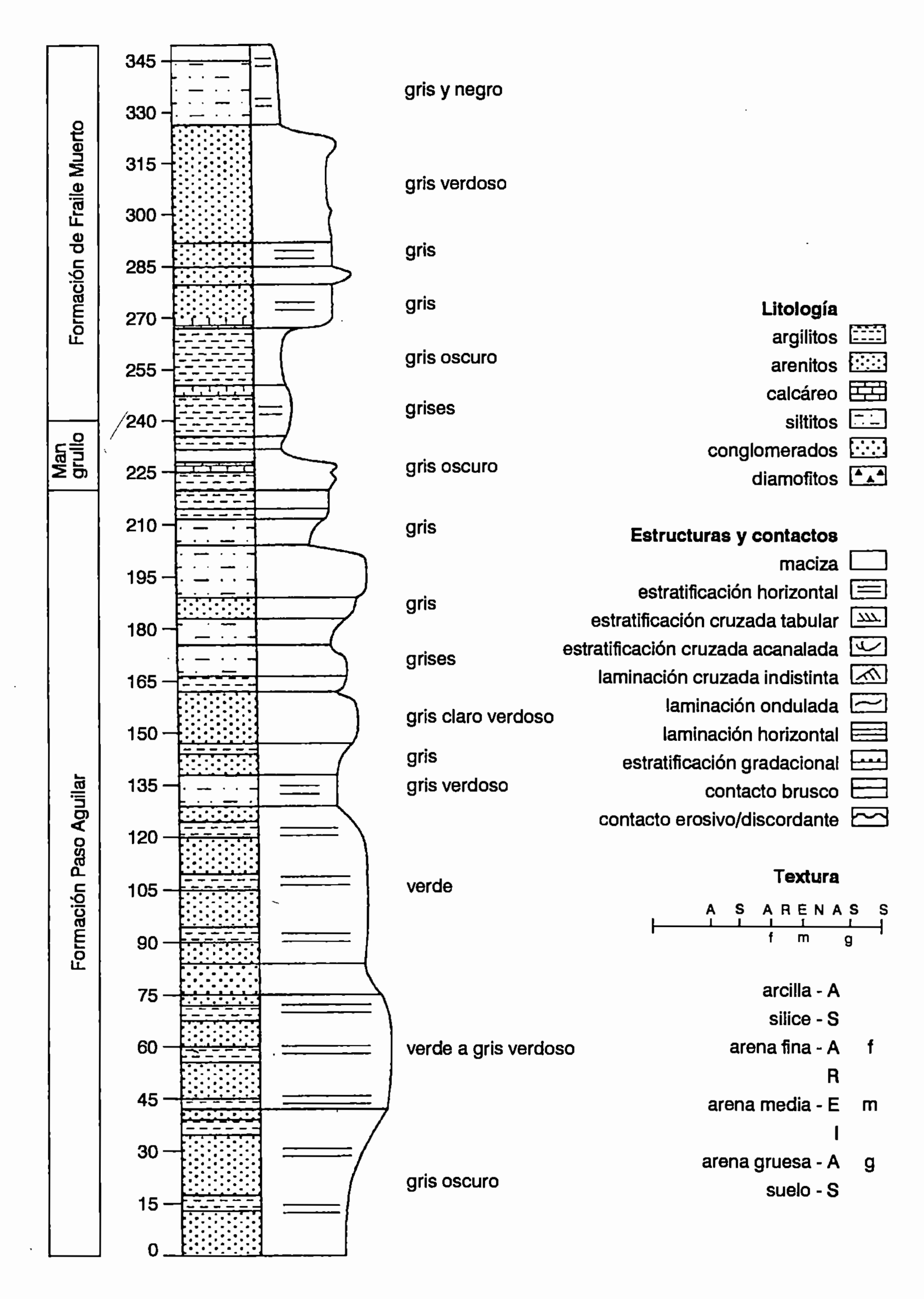
Este miembro aflora en los departamentos de Tacuarembó y Cerro Largo. En profundidad en los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Tacuarembó, Cerro Largo y Río Negro. No se ha definido la sección tipo de esta formación. Figura 6.

Formación Yaguarí

Antecedentes

Caorsi y Goñi (op. cit.) proponen el término informal de "areniscas arcillosas y arcillas de Yaguarí" para definir areniscas de colores rojos, equivalentes a "Estrada Nova" de Falconer (1931). Bossi (op. cit.) le da carácter formacional.

Figura 6. Perfil Litológico del Grupo Melo.
J. Montaño, P. Collazo, 1997. Fuente: Bossi & Navarro, op. cit.



Elizalde (1967) y Elizalde et al. (op. cit.) presentan divisiones estratigráficas en un miembro superior, subdividido a su vez en tres capas y en un miembro inferior.

El miembro inferior está integrado dominantemente por una limolita micácea y arcillosa de estratificación paralela. Siguiendo en menor proporción areniscas finas a muy finas bien seleccionadas y lutitas. Este miembro es de idéntica composición que la Formación Paso Aguiar, apoyándose de forma concordante, diferenciándose de ésta únicamente por su color de oxidación.

A continuación se expone la granulometría de las litologías dominantes de este miembro, según Elizalde et al (op. cit.) en Bossi & Navarro, (op. cit.).

Diámetro (mm)	**Limolita %**	**Arenisca %**	**Lutita%**
0,500 - 0,250	1,00	0,00	0,00
0,250 - 0,120	18,0	16,0	0,00
0,120 - 0,060	22,0	50,0	2,00
0,060 - 0,030	16,0	13,0	4,00
0,030 - 0,016	12,0	4,00	9,00
0,016 - 0,008	7,00	2,00	16,0
0,008 - 0,004	5,00	1,00	18,0
0,004 - 0,002	4,00	1,00	16,0
menor a 0,002	17,0	13,0	36,0
Md (mm)	0,040	0,090	0,004

El miembro superior está compuesto por areniscas finas dominado sobre limolitas, areniscas conglomerádicas, calizas y lutitas en menor proporción.

Las granulometrías dominantes, según Elizalde et al. (op. cit.) en Bossi & Navarro, (op. cit.) son:

Tamaño (mm)	Areniscas %			Limolitas %	
0,500 - 0,250	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,250 - 0,120	12,0	1,00	10,0	0,00	0,00
0,120 - 0,060	53,0	23,0	32,0	54,0	7,00
0,060 - 0,030	14,0	41,0	22,0	19,0	22,0
0,030 - 0,015	1,00	16,0	11,0	7,00	22,0
0,015 - 0,008	3,00	3,00	5,00	3,00	16,0
0,008 - 0,004	3,00	1,00	1,00	3,00	9,00
0,004 - 0,002	1,00	2,00	4,00	2,00	8,00
menor a 0,002	14,0	12,0	16,0	13,0	17,0
Md (mm)	0,08	0,04	0,05	0,07	0,02

Ferrando y Andreis (op. cit.) proponen denominar Formación Yaguarí a la unidad "Estrada Nova" de Falconer (1937) conteniendo a las areniscas finas y a las pelitas rojas.
Bossi & Navarro (op. cit.) proponen designar Subgrupo Yaguarí-Buena Vista

Litología

Se distinguen en esta formación un miembro inferior y otro superior.
El Miembro Inferior corresponde a la base de la Formación Yaguarí y presenta la misma litología que la Formación Paso Aguiar, exceptuando los colores que son rojos, característicos de un ambiente oxidante. Está representado principalmente por limolitas y en menor proporción aparecen areniscas muy finas, constituyendo ambas una estratificación paralela.
El Miembro Superior está constituido por una alternancia de areniscas finas a muy finas y limolitas, de color rojo, con estratificación paralela. Las areniscas dominan sobre las limolitas en una relación 65% a 35% respectivamente. Son frecuentes los nódulos, lentes calcáreos y de montmorillonita cálcica de gran pureza.

Estructuras sedimentarias

Se desarrolla en esta formación estratificación lenticular.

Ambiente de depositación

Según Ferrando & Montaña (op. cit.), los cambios cromáticos que caracterizan esta formación, sugieren una gradual modificación del Eh del medio hacia condiciones más oxidantes. La ausencia de grietas de desecación prueba la existencia de aguas permanentes, y en la parte superior debido a cambios en la estratificación y litológicos, parece indicar una creciente influencia fluvial.

Edad

Pérmico Superior.

Relaciones de contacto

La Formación Yaguarí sigue en concordancia a Melo y el contacto entre ambas es gradacional. En los alrededores de las islas cristalinas Cuñapirú-Vichadero y Aceguá, los sedimentos de Yaguarí transgreden a los inferiores y se apoyan directamente sobre las rocas Predevonianas. (Ferrando & Montaña, op. cit.).

Espesor de la formación

El máximo espesor de la zona oriental se encuentra en el pueblo Bañado de Medina con 163m, mientras que para la zona occidental alcanzaría valores de 470m, registrados en el sondeo de Paso de Las Piedras. (Ferrando & Montaña, op. cit.).

Extensión y área tipo

Aflora en los departamentos de Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo y subsuperficialmente en los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú y Río Negro.

Formación Buena Vista

Antecedentes

Esta unidad fue separada originariamente por Falconer (op. cit.), como uno de los dos tipos que componían el Grupo "Estrada Nova".
Ferrando & Andreis (op. cit.) vuelven a considerar esta formación en el mismo sentido que Falconer (op. cit.), separándola de la Formación Yaguarí, según fue definida por Bossi (op. cit.).

Litología

Son areniscas finas a gruesas y conglomerádicas, interestratificadas con lentes calcáreos y niveles conglomerádicos. Las areniscas son de color rojo, feldespáticas con estratificación cruzada dominante.

Estructuras sedimentarias

Se observan estructuras entrecruzadas.

Ambiente de depositación

Según Miall (1982), la Formación Buena Vista evidencia un sistema fluvial entrelazado medio a distal.

Edad

Triásico Inferior.

Relaciones de contacto

Esta formación se apoya en concordancia sobre las sedimentitas de la Formación Yaguarí.

Espesor de la formación

Presenta una potencia máxima de 50m.

Extensión y área tipo

Superficialmente se encuentra en: zona Buena Vista-Bañado de Medina (departamento de Cerro Largo), alrededores de la localidad de La Calera (departamento de Rivera), y en el departamento de Tacuarembó. En profundidad se ha registrado en los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú y Río Negro.
Se toma como sección tipo de la formación, el perfil a lo largo del camino que sale hacia el oeste desde la ruta nacional Nº 8, a 3 km al sur de la localidad de Buena Vista.

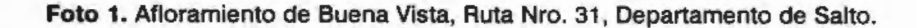


Foto 1. Afloramiento de Buena Vista, Ruta Nro. 31, Departamento de Salto.

Grupo Batoví Dorado

Antecedentes

Este conjunto de rocas sedimentarias fue correlacionado inicialmente por Walther (1919) con las areniscas de Botucatú del sur del Brasil.
Falconer (op. cit.) denomina "areniscas de Tacuarembó" al conjunto de areniscas que aflora en los departamentos de Tacuarembó y Rivera.
Bossi et al (1975) proponen subdividir la Formación Tacuarembó en dos miembros:
a) uno inferior, caracterizado por alternancia de areniscas finas, muy finas y medias, limolitas y conglomerados intraformacionales, todas de origen subacuático; y
b) un miembro superior, constituido por la fosilización de dunas en clima desértico.
Sprechmann et al (1981) mantienen esta división, y toman como sección tipo el Cerro Batoví en el departamento de Tacuarembó.
Ferrando (1984) propone una nueva unidad estratigráfica, integrada por areniscas de origen eólico entre el tope de la Formación Buena Vista y la base de la Formación Tacuarembó.
Debido a esta nueva unidad estratigráfica, Ferrando y Montaña (op. cit.) proponen denominar Grupo Batoví Dorado a las areniscas cuspidales del Supergrupo Gondwana (en Bossi, op. cit.)
El Grupo Batoví Dorado estaría representado de base a cima por:

- una secuencia de areniscas finas a medias, bien seleccionadas, de granos redondeados, de origen eólico, pertenecientes a la Formación Cuchilla Ombú;
- una secuencia de areniscas finas a medias interestratificadas con limolitas, siltitas, fangolitas, lutitas y conglomerados intraformacionales, pertenecientes a la Formación Tacuarembó;
- hacia la cima, una secuencia de areniscas cuarzosas de grano fino a medio muy bien seleccionadas, de color blanco, de origen eólico, denominada Formación Rivera. (Ferrando y Andreis, op. cit.).

Ambiente de depositación

El ambiente de sedimentación propuesto para este grupo,

sería en la base y en la cima desértico, y en la zona intermedia un ambiente fluvial.

Edad

Triásico - Jurásica.

Relaciones de contacto

Se desarrolla sobre la Formación Buena Vista en aparente discordancia.

Extensión y área tipo

Este Grupo se encuentra superficialmente de N a S entre las ciudades de Rivera y San Jorge. En algunas zonas de los departamentos de Cerro Largo y Tacuarembó aparece como relictos de erosión. En profundidad se encuentra en los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Rivera, Tacuarembó y Río Negro.
Dentro del Grupo Batoví Dorado se distinguen, entonces:

Formación Cuchilla Ombú

Antecedentes

Andreis y Ferrando (op. cit.) evidencian un episodio eólico en la base de lo que se denominaba Formación Tacuarembó y le asignan más tarde el nombre de Cuchilla Ombú.

Litología

La Formación Cuchilla Ombú está integrada por areniscas finas hasta medias, con raras limolitas. Presentan tonalidades amarillentas con pigmentación rojiza. Las sedimentitas pelíticas son verdosas. Ferrando & Montaña (op. cit.).

Estructuras sedimentarias

Las areniscas muestran un notable predominio de estructuras entrecruzadas de tipo cuneiforme planar, que corresponderían a barjanes de porte grande. En la parte superior las escasas pelitas aparecen en estratos tabulares delgados macizos, laminados o con raras ondulitas. Ferrando, Andreis & Montaña (1987).

Ambiente de depositación

Los areniscas de esta formación muestran claramente su origen eólico. Hacia la cima, fueron temporariamente invadidas y/o cubiertas por cuerpos de agua someros, en los que sedimentaron los materiales pelíticos. Ferrando & Montaña (op. cit.).

Edad

Triásico Superior.

Relaciones de contacto

Esta formación se desarrolla en forma discordante sobre la Formación Buena Vista.

Espesor de la formación

Según Ferrando & Montaña (op. cit.), su potencia no sobrepasa los 50m.

Extensión y área tipo

La zona principal de afloramientos constituye una faja con dirección N-S, que se apoya sobre la Formación Yaguarí al norte (Ataque, departamento de Rivera) y al centro de la cuenca (Ruta Nro. 26); también se apoya sobre el Basamento Cristalino en el Paso Manuel Díaz (Tacuarembó), (Ferrando y Andreis, op. cit.).
Se toma como sección tipo, los perfiles de los alrededores

de la localidad de Cuchilla Ombú en el departamento de Tacuarembó.

Formación Tacuarembó

Antecedentes

Esta formación fue designada en 1937 por Falconer (op. cit.) y luego replanteada en 1966 y 1975 por Bossi (op. cit.) y en 1986 por Ferrando & Andreis (op. cit.).

Litología

Según Sprechmann et al. (op. cit.), está formada principalmente por areniscas finas, bien seleccionadas, redondeadas a subangulosas, feldespáticas, de color gris blanquecino a verde, con estratificación cruzada; le siguen en porcentaje areniscas finas a medias, bien seleccionadas, cuarzosas, masivas, de color rosa pálido a blancuzco; limolitas con tonalidades verdosas y lutitas de color violáceo y en menor proporción conglomerados.
Está integrada, según Andreis & Ferrando (op. cit.), por areniscas finas hasta gruesas, pelitas y escasos conglomerados clastosostén polimícticos. Los colores son variados; entre los más frecuentes pueden citarse castaño claro, rojizos, amarillentos, blanco y verde.
Según Bossi (op. cit.) las arcillas de esta unidad serían dominantemente de naturaleza montmorillonítica.
En la Figura 7 se muestra el perfil litológico de esta formación según Bossi y Navarro (op. cit.).

Estructuras sedimentarias

Las secuencias aflorantes muestran evidente tabularidad (los contactos son planos).
Las areniscas medias desarrollan estructuras entrecruzadas en artesa, mientras que las finas presentan ondulitas y/o laminación, que a su vez son cubiertas por pelitas laminadas. Ferrando; Andreis & Montaña (op. cit.).

Ambiente de depositación

Según Miall (op. cit.), la Formación Tacuarembó, debido a la abundancia de areniscas finas y medias y la existencia de ciclos granodecrecientes, es interpretada como depositada por un sistema fluvial entrelazado distal.

Edad

Jurásico Medio e Inferior.

Relaciones de contacto

Se apoya sobre Cuchilla Ombú, desde la ciudad de Rivera en el norte hasta San Jorge en el sur, donde por lo menos en parte se apoya sobre San Gregorio; es posible que en el sur del departamento de Tacuarembó, estas litologías se desarrollen sobre las demás unidades de edad Pérmica. (Ferrando; Andreis & Montaña, op. cit.)

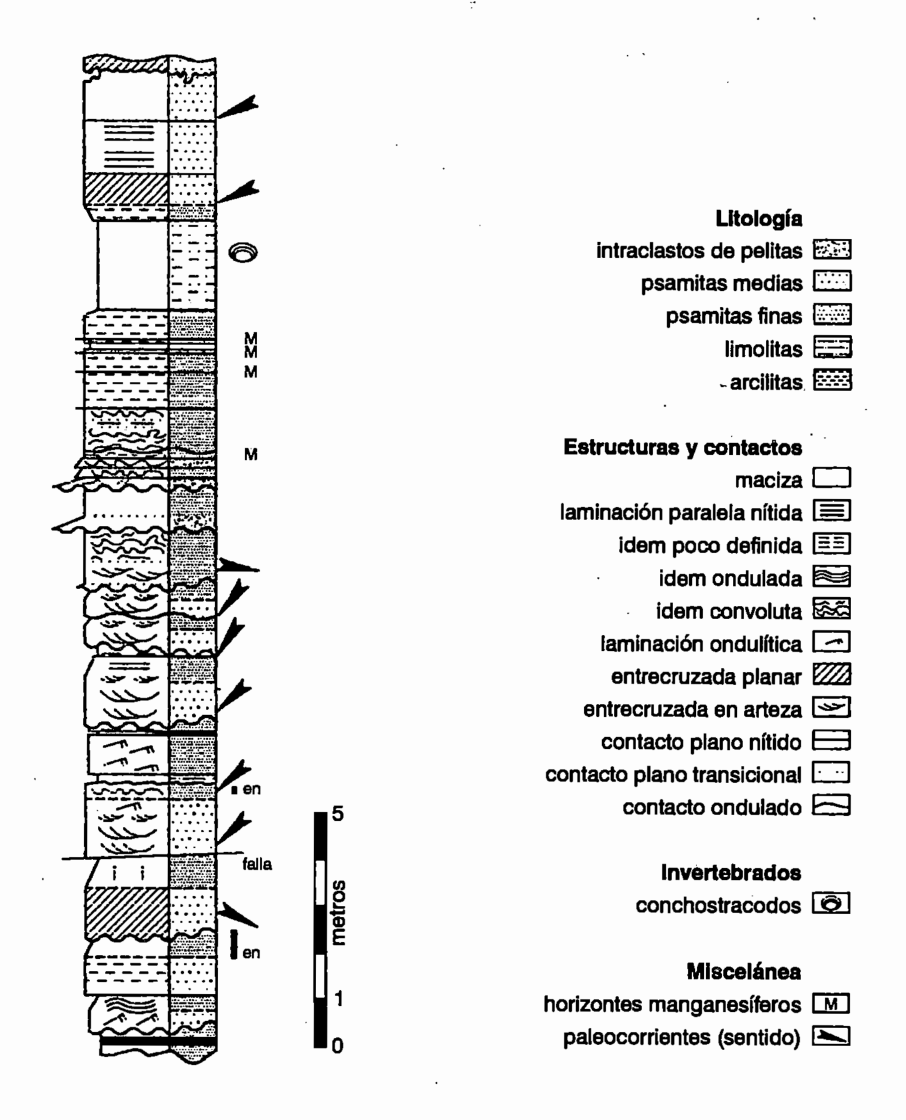
Espesor de la formación

El espesor máximo encontrado, de acuerdo al sondeo de Bañado de Rocha, es superior a los 400m, según Goñi y Delancy (1961), Sprechmann et al (op. cit.) proponen un espesor máximo de 80m.

Extensión y área tipo

Esta unidad aflora a lo largo de una faja con dirección aproximada N-S, desde la ciudad de Rivera en el norte hasta San Jorge en el sur. (Bossi, op. cit.).
Esta formación constituye el subsuelo de la ciudad de Tacuarembó y es por ello que lleva su nombre. La sección tipo puede observarse en cualquier perfil cercano a la ciudad de Tacuarembó.
Un perfil típico se describe en el km 4 de la Ruta Nro. 27:
• Arenisca arcillosa con nódulos de óxido de hierro, de color pardo rojizo, de edad Holocena. Espesor 100cm.

Figura 7. Perfil Litológico de la Formación Tacuarembó.
J. Montaño, P. Collazo, 1997. Fuente: Bossi & Navarro, op. cit.



• Arenisca fina a media, muy bien seleccionada, cuarzosa, redondeada a subangulosa, friable, estratificación cruzada de corto trecho, color pardo claro a rosada, con pequeñas manchas de óxido de hierro. Espesor 80cm.
• Limo arenoso, fino, masivo, lenticular, color pardo claro a rosado. Espesor 40cm.
• Arenisca fina, limosa, cuarzosa, redondeada, friable, estratificación paralela por color, color pardo anaranjado, con manchas de óxido de hierro. Espesor 80cm.
• Arenisca limosa, muy fina, cuarzosa, redondeada, masiva, friable, cemento arcilloso, color verde pálido con manchas de óxido de hierro. Espesor 100cm.

Formación Rivera

Antecedentes

Designada por Ferrando (1986) a lo que Bossi et al. (op. cit.) denominaron Miembro Superior de la Formación Tacuarembó.

Litología

Constituida por areniscas finas a medias, cuarzosas, bien seleccionadas, con granos redondeados, de tonalidades variables, rosada, anaranjada y amarilla. Sprechmann et al. (op. cit.).
Según Andreis, Ferrando (1986), está compuesta en su mayoría por areniscas medias (las variedades finas son escasas) y algunas brechas o conglomerados basales. Presentan tonalidades amarillentas y rojizas o tonos blanquecinos debido a procesos de decoloración.
Según Bossi et al. (op. cit.), los arcillominerales son de naturaleza caolinítica.

Estructuras sedimentarias

Según Sprechmann et al. (op. cit.), las areniscas presentan estratificación cruzada de tipo eólica, tabular-plana y cuneiforme-planar.
Ferrando, Andreis & Montaña (op. cit.) concuerdan con el autor anterior, en cuanto a las estructuras observadas.

Ambiente de depositación

Con la sedimentación de las areniscas de la Formación Rivera, se instala un extenso campo de dunas que se extiende hacia el Brasil y Argentina, marcando un período de desertificación importante en la cuenca del Paraná. Ferrando & Montaña (1986).

Edad

Se conoce con certeza sólo el límite superior que está determinado por los derrames basálticos agrupados en la Formación Arapey correspondiente al Cretácico Inferior.

Relaciones de contacto

Los sedimentos de la Formación Rivera se depositaron discordantemente sobre los sedimentos de la unidad recién descripta.
Los derrames basálticos de la Formación Arapey constituyen el techo de esta sedimentación gondwánica.

Espesor de la formación

El espesor máximo puede alcanzar hasta 100m. En el área de afloramiento, la potencia de Rivera no supera los 30m.

Extensión y área tipo

Aflora en una muy estrecha faja desde el área tipo hasta la altura de la ciudad de Tacuarembó. En profundidad no se conoce exactamente su desarrollo y potencias. Ferrando & Montaña (op. cit.).
La sección tipo, propuesta por Sprechmann et al. (op. cit.), es el perfil de la Gruta de los Cuervos en el departamento de Tacuarembó.

Foto 2. Formación Rivera, Camino Paso del Cerro. Departamento de Tacuarembó.



Formación Arapey (Cretácico)

La Formación Arapey abarca un área de 41.500Km² en el extremo NW del país y está representada por una sucesión de derrames basálticos. Dichos derrames fueron reconocidos por Walther (op. cit) y denominados lavas de Arapey por Caorsi y Goñi (op. cit.).

Entre los derrames se reconocen delgados niveles de areniscas eólicas interestratificadas.

El área basáltica se divide en cinco zonas estructurales, en función del buzamiento y espesor de coladas.

Cada derrame presenta una potencia que varía entre 10 y 60m. Se observan distintos tipos de coladas, que según Walther (1932) responden a variaciones de viscosidad y velocidad de erupción del magma.

Se pudo observar a través de estudios petrográficos que cada colada conserva ciertas características petrográficas constantes permitiendo su identificación y diferenciación de otros derrames. (Fernández y Ledesma, 1974).

Los rasgos mineralógicos dependientes de la composición química del basalto también son permanentes a nivel de cada colada.

En la Figura 8 se muestra la Carta Geológica y en la Figura 9 las referencias de la Columna Estratigráfica correspondiente.

Las Figuras 10 y 11 representan los Cortes Geológicos AB y BC, cuya traza se indica en la Carta Geológica señalada anteriormente.

Foto 3. Basalto vacuolar de la Formación Arapey. Departamento de Salto.

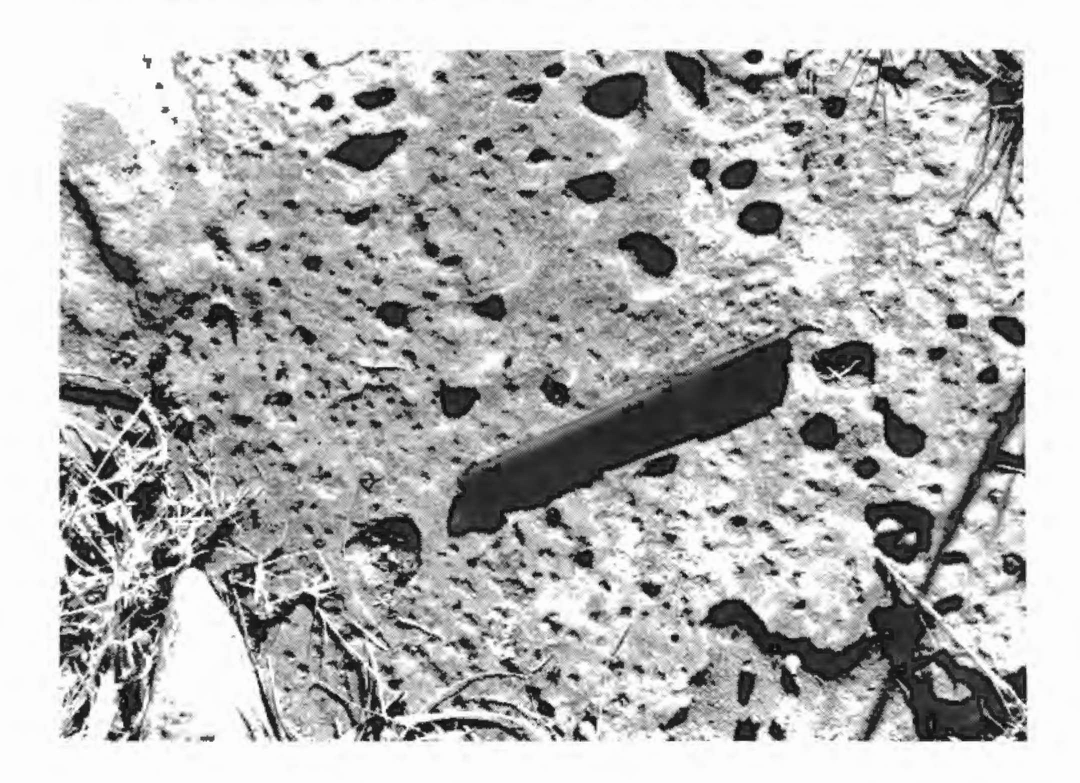


Figura 8. Carta Geológica.
J. Montaño, P. Collazo, 1997.

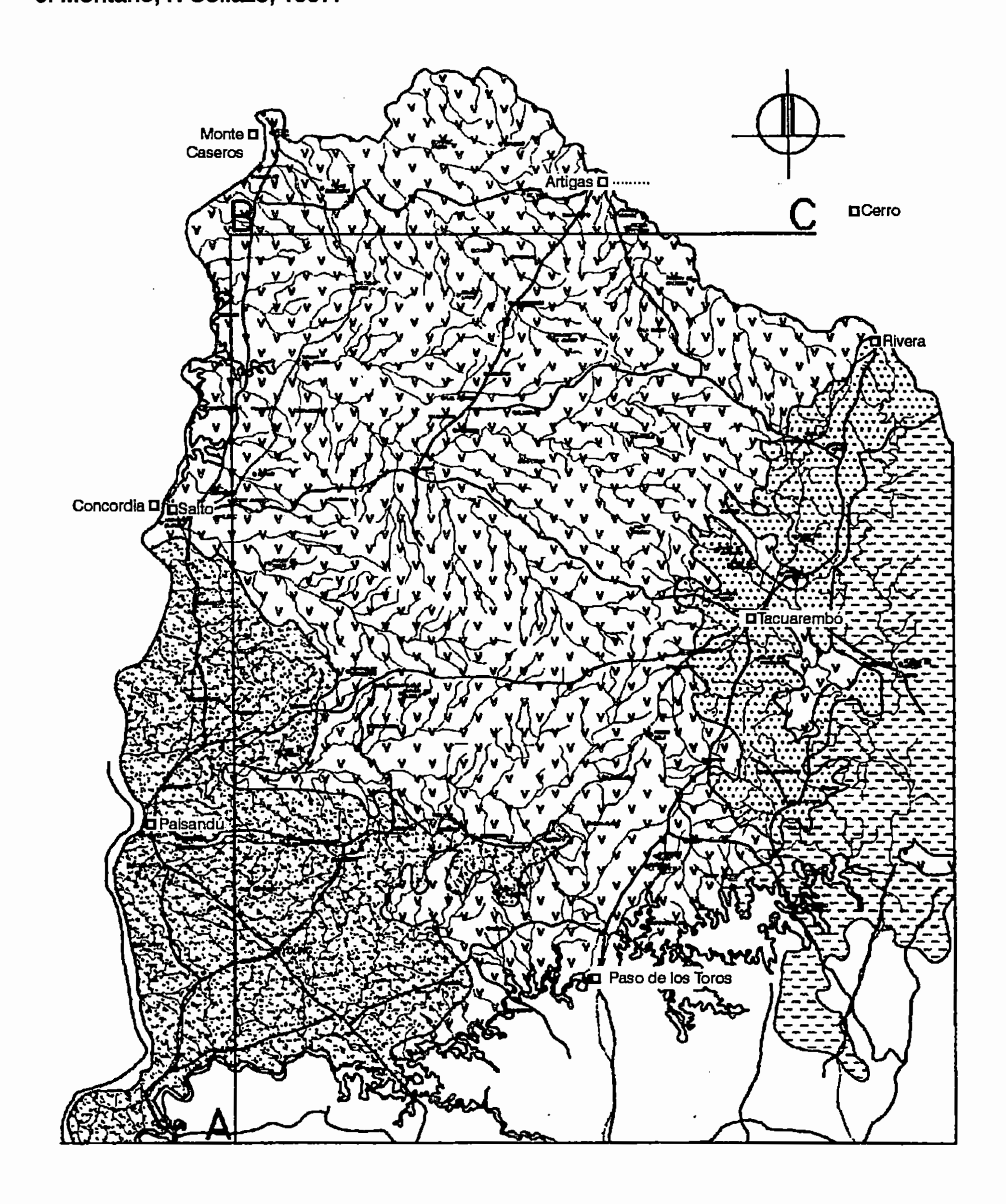


Figura 9. Columna estratigráfica.
Referencias.

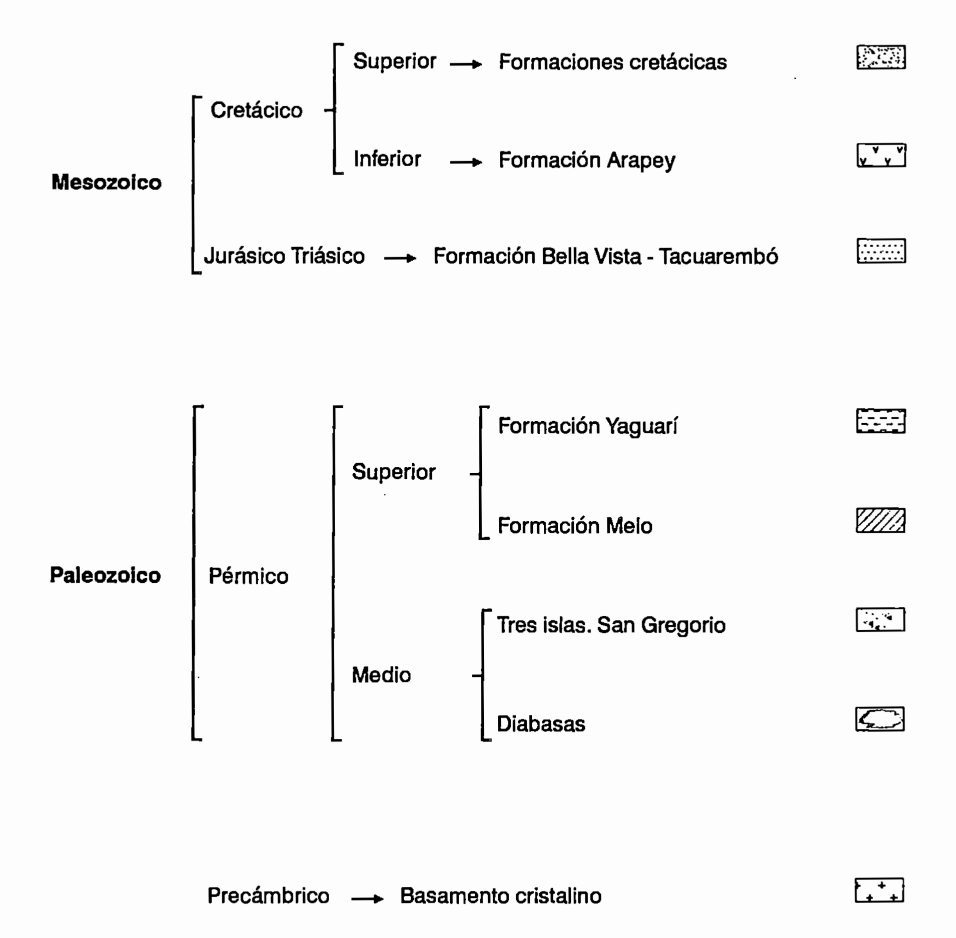


Figura 10. Corte Geológico.
J. Montaño, P. Collazo, 1997.

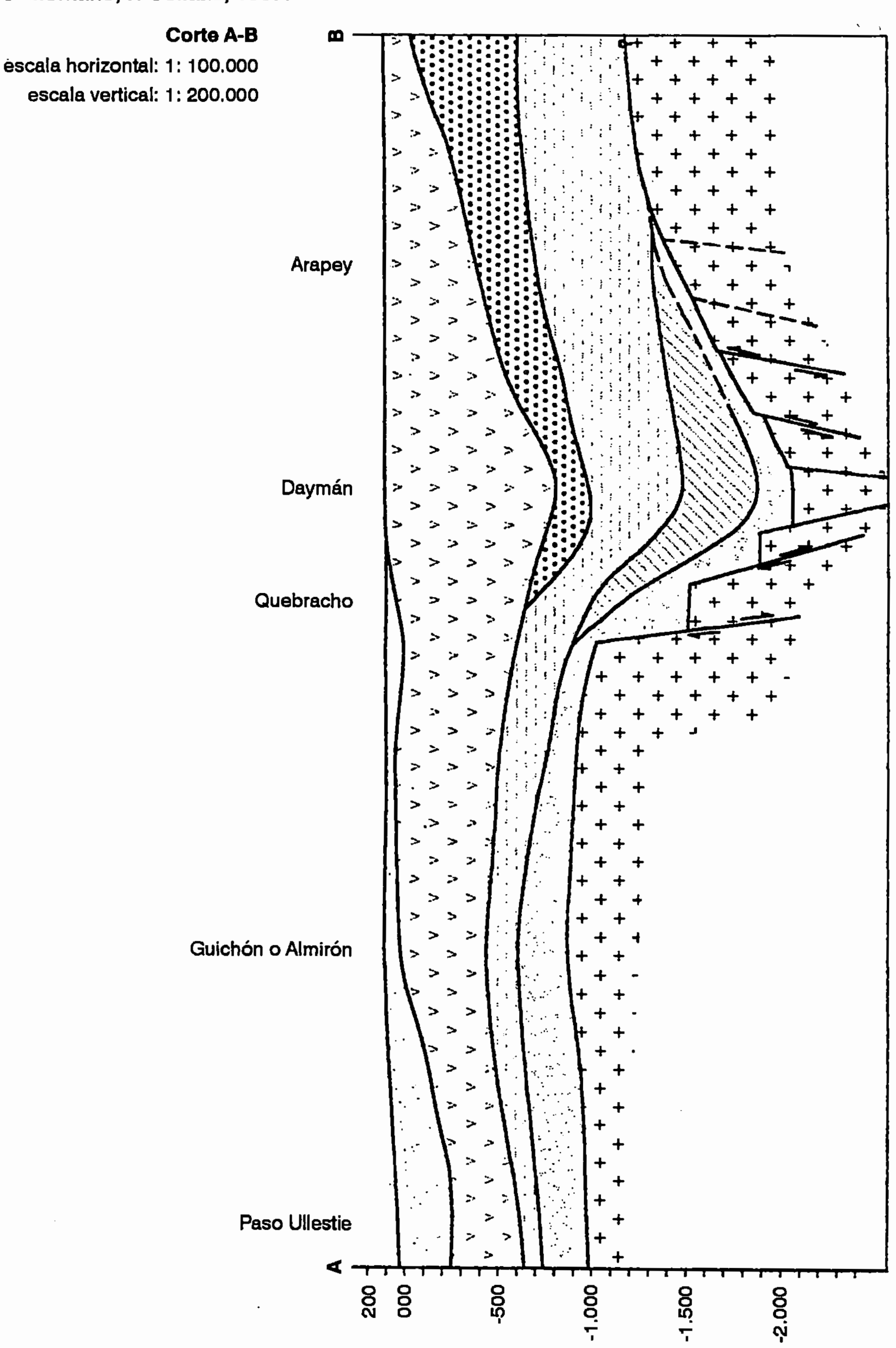
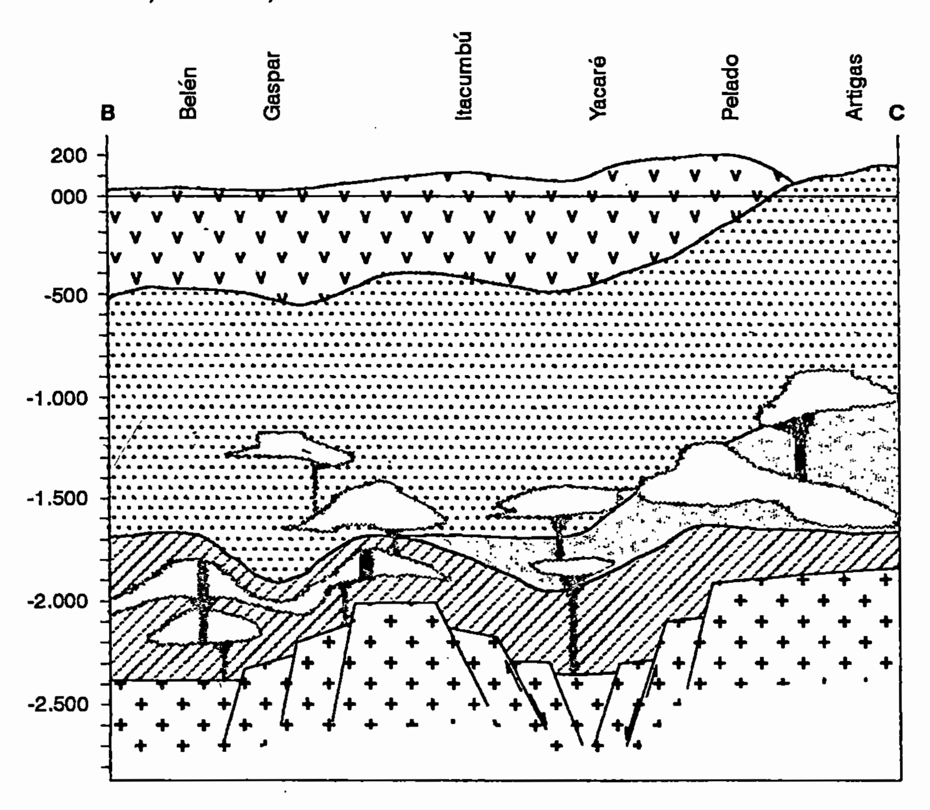


Figura 11. Corte geológico.
J. Montaño, P. Collazo, 1997.



Corte B-C
escala horizontal: 1: 100.000
escala vertical: 1: 200.000

Hidrogeología

Introducción

El Sistema Acuífero Guaraní es la denominación utilizada para referirse a un paquete de rocas arenosas, pertenecientes al Grupo Batoví Dorado, con espesores máximos que varían entre 400 y 650m, los cuales se encuentran totalmente saturados de agua dulce.
Esta capa acuífera ocupa una superficie aproximada a los 45.000km^2. En la mayoría del área se encuentra protegido por una capa de basalto de la Formación Arapey (Serra Geral) de edad Cretácico, cuyo espesor máximo supera los 1000m.
Es considerado uno de los mayores reservorios de agua del mundo. La explotación de pozos profundos permite obtener caudales de surgencias entre 300 a 400m^3/h pudiendo alcanzar valores cercanos a 1000m^3/h por bombeo.
Estos parámetros resumen la importancia de la reserva hídrica que coincide con los Países del MERCOSUR y marca la importancia como fuente hídrica de alta calidad para abastecimiento de pequeñas a grandes ciudades, riego, abastecimiento industrial, etc. Otro atributo de esta fuente hídrica es su surgencia y termalismo en varias zonas como por ejemplo, en los Departamentos de Paysandú, Salto y Artigas.
Estas aguas pueden alcanzar temperaturas de hasta 45°C, explotándose en la actualidad solamente como fuente de

agua termal y abastecimiento público, pero también se debe incluir como alternativa de solución en prevención de heladas, secado de granos, de abastecimiento de complejos deportivos, hospitales, etc.

El Sistema Acuífero representa en este momento una gran reserva estratégica que puede ser utilizada como fuente hídrica sustentable para acelerar el desarrollo socioeconómico del MERCOSUR con menos recursos financieros de los que normalmente son exigidos para la construcción de represas, ahorrando también los impactos ambientales que éstas producen.

Estructura del Acuífero

El Acuífero Guaraní (uno de los mayores del mundo) está constituido por areniscas de edad Triásico-Jurásico, confinadas por los derrames basálticos cretácicos y cubre aproximadamente un área en Uruguay de 100.000 km^2.

El presente modelo conceptual del acuífero fue elaborado a partir de la compilación de datos de 135 pozos. Con esta información se confeccionó un mapa de isopacas de acuífero y de su techo, mapa potenciométrico y de isotermas.

El espesor total de este acuífero varía desde valores mayores a los 200m hasta la total ausencia hacia el sur de la terma de Guaviyú (Departamento de Paysandú) marcando la aproximación al límite de la Cuenca.

La actual configuración de la Cuenca es resultante de varios episodios tectónicos ocurridos durante el Paleozoico y fundamentalmente a comienzos del Mesozoico que condicionaron la paleotopografía de la cuenca y los espesores de los cuerpos sedimentarios.

El desarrollo estructural del acuífero fue controlado por los altos: 1) Mercedes al Sur, 2) Itapebí-Tambores de orientación N45W y Vichadero-Cuñapirú-Gaspar.

La presencia de direcciones de paleocorrientes del NW al SE en las eolianitas, así como la instauración tardía de los ámbitos continentales en la subcuenca Este (Triásico), contribuirían a sustentar la idea de que la continentalización se instauraría tempranamente en el NW avanzando en dirección SE (De Santa Ana, 1991), determinando que el mayor depocentro del acuífero se encuentra en la zona de Bella Unión.

Para la interpretación hidrodinámica se propone la división del sistema acuífero en los siguientes modelos conceptuales, reflejando el comportamiento hidráulico en la zona aflorante y en la zona confinada.

Zona aflorante

Ocupa un área de 3700 km^2 en una faja de dirección N-S con un largo de 160 km y un ancho medio de 35-40 km. Al interpretar hidrogeológicamente el subsuelo de la región se puede realizar la siguiente división:

Grupo	Formación	Litología	Capacidad del acuífero
Batoví Dorado	Rivera	- areniscas finas medias	Bueno
	Tacuarembó	- areniscas y pelitas	Regular
	Cuchilla Ombú	- areniscas finas a medias	Bueno

Este paquete sedimentario del Grupo Batoví Dorado se caracteriza por una sucesión de sedimentos de diferente permeabilidad, que lleva a clasificarlos en acuíferos con alta permeabilidad (Formación Rivera y Cuchilla Ombú) y de baja permeabilidad (Formación Tacuarembó). En función de esta división se clasifica la región en:

Area Rivera

Se desarrolla el Sistema Acuífero con un predominio de sedimentos de origen eólico, presentando en esta zona los mayores espesores. La transmisividad (T) para el acuífero Rivera y Cuchilla Ombú tiene valores de 150 m^2/día. Estos fueron obtenidos a través de ensayos de bombeo, realizados en la ciudad de Rivera en pozos de abastecimiento público (OSE), cuyos resultados se resumen a continuación:

Nro. de Pozo	Prof.	Acuífero predominante	T (m^2/día)	q (m^3/h/m)
724/1	84,50	Rivera	155	3,43
961/1	102,50	Rivera	151	3,44
1161	51,30	Rivera	140	2,7

El valor del coeficiente de almacenamiento S es 10^{-3}, indicativo del semiconfinamiento del acuífero.
Los valores del caudal específico (q), son del orden de 3m^3/h/m y los rendimientos de los pozos varían entre 50 y 110m^3/h.

Se destaca que los cálculos de abertura de filtro y tamaño de prefiltro son realizados en forma estimativa, lo que resulta en obras de baja eficiencia con bajos rendimientos en los pozos.

Area Tacuarembó

El sistema acuífero que predomina es el acuífero Tacuarembó, constituido por areniscas y pelitas de origen fluvial. La explotación del acuífero es baja debido fundamentalmente a su bajo potencial, por presentarse predominantemente los sedimentos finos. La profundidad media de los pozos en la zona es de 80m y un caudal medio de 3,5m^3/h; el caudal específico medio es de 20m^3/día/m.
Los pozos que atraviesan este acuífero, tienen valores de transmisividad inferiores a los presentados en el área Rivera, del orden de 25m^2/día.

Zona confinada

Ocupa un área aproximada de 38.000km^2, al oeste del país. Dentro de la zona confinada ocurrirían dos sistemas acuíferos, compuestos: el primero por un paquete sedimentario constituido por las formaciones Tacuarembó-Buena Vista-Yaguarí; y el segundo por un paquete sedimentario constituido por las formaciones San Gregorio-Tres Islas.
No existen datos de los parámetros hidráulicos del mismo en toda el área, sólo se ha realizado un ensayo en un pozo ubicado en la ciudad de Artigas donde se determinó la transmisividad, con un valor de 360m^2/día, y la permeabilidad de 1,27m/día. Igualmente estimaciones de la transmisividad realizadas por IPT y Tahal, dan valores que van desde 250m^2/día para la zona SE hasta 1500m^2/día para la NW.

Isopacas del Acuífero

El espesor total del acuífero varía desde más de 50m en Guaviyú hasta más de 200m. Al Sur de Guaviyú se produce la ausencia del acuífero en aproximación al límite sur de la cuenca. Lo anterior queda demostrado en los pozos de Almirón y Paso Ullestie. En general los espesores son mayores a los 200m y tienden a predominar a lo largo de un eje de dirección NNE-SSW.
Los movimientos verticales ascendentes en los bordes de la

cuenca, que tuvieron lugar durante la fase rift, momento de la separación de Africa y América del Sur, a través del efecto "shoulder" del rift en la margen E y por la orogénesis Andina en el borde W, fueron los responsables por la actual configuración estructural de la misma.

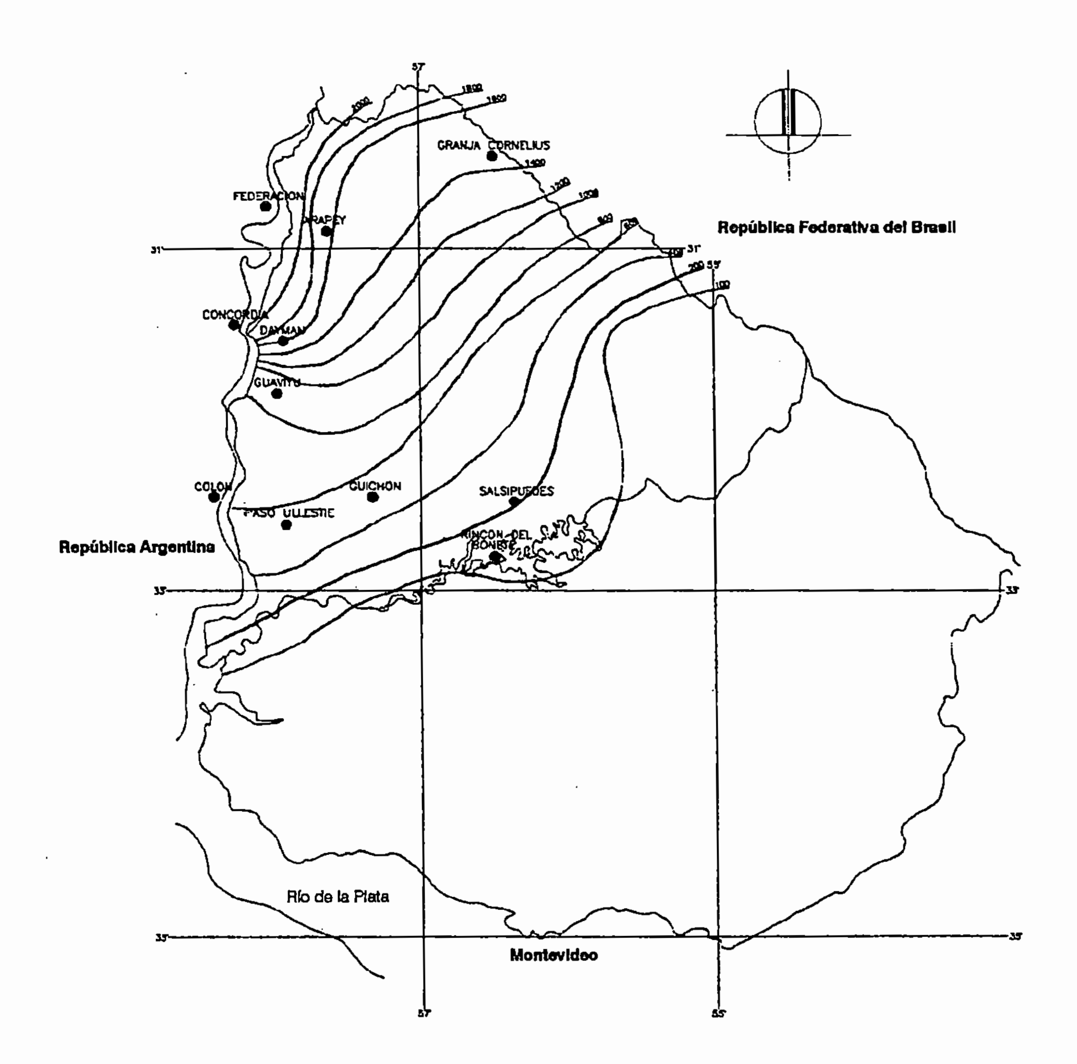
Isopacas del techo del Acuífero

El comportamiento de las isopacas de las rocas que yacen por encima del Acuífero está controlado por los derrames de basalto de la Formación Serra Geral, por el eje depositacional del Cretácico-Terciario y por la reactivación regional del sistema de fallas.
El nivel de los movimientos de levantamiento de los bordes cuencales influyó directamente en el registro sedimentario posterior, pudiéndose observar en los mapas de isopacas de las rocas que están por encima del Acuífero. Los mayores espesores se encuentran en la zona de Salto con 1000m de espesor en el sur con registros de 400m en Paso Ullestie. Estos datos son fundamentales para establecer los costos de las futuras perforaciones y el valor del m^3 de agua a extraer. Figura 12.

Reservas del Acuífero

Uno de los elementos fundamentales para el análisis cuantitativo de los acuíferos y poder planificar la optimización de su explotación es determinar las reservas hídricas.
Como paso previo al análisis fijamos los valores de reserva que son considerados en la mayoría de los estudios de explotación de acuíferos.
En primer término, establecemos las reservas reguladoras, como el volumen de agua de la zona de fluctuación del nivel de saturación (estacional o anual), que representa el activo del sistema y corresponde al volumen de realimentación estacional o anual del mismo.
Para la evaluación de las mismas se debe analizar por separado el acuífero en la zona aflorante y confinada. Para la primera, se establece que los aportes son directos, para la segunda serían indirectos, aportados a través de las formaciones geológicas que están apoyadas sobre el sistema acuífero, imposible de determinar para el nivel actual del conocimiento. En función de los balances hidrometeorológicos primarios, resulta que el 3% de la precipitación anual (1.300mm) sería la recarga natural del acuífero, o sea 39mm/año, que para el área aflorante (3.700km^2) alcanza valores entre 1,4x$10^5$$m^3$/año.

Figura 12. Isopacas techo de San Gregorio.
INGEPA.



Las reservas permanentes se corresponden con el volumen de agua que se encuentra por debajo de la zona de fluctuación anual o estacional. Estas reservas dan el valor del volumen de agua almacenada en un acuífero y las reservas reguladoras indican cómo son las condiciones de recarga. Para la zona aflorante, si establecemos un espesor medio de acuífero de 100m y una porosidad eficaz de 0,15 para el área de 3.700km^2, la reserva permanente es de 5,6x10^{10}m^3. En la zona confinada consideramos un espesor medio de 600m, un coeficiente de almacenamiento de 10^{-4} y un área de 38.000km^2, lo que determina una reserva de 2,3x10^{9}m^3. Por lo tanto la reserva permanente total es de 5,8x10^{10}m^3.

Reservas Reguladoras

Precipitación	Infiltración	Area aflorante	Recarga
1.300 mm	3%	3.700 km^2	1,4 x 10^8 m^3/año

Reservas Permanentes

Zona	Area (km^2)	Esp. del acuífero (m)	S	Volumen (m^3)
No confinado	3.700	100	0,15	5,6 x 10^{10}
Confinado	38.000	600	10^{-4}	2,3 x 10^9

En último término debemos determinar las reservas explotables que se pueden evaluar a partir principalmente de las reservas reguladoras y de datos técnicos y económicos.
Es importante destacar la gran diferencia existente en la zona por la presencia de los acuíferos semiconfinados (Tacuarembó y Rivera), relativamente poco potentes y los acuíferos confinados y muy potentes (Sistema Tacuarembo-Buena Vista-Yaguarí, Sistema San Gregorio-Tres Islas).
Los primeros presentan normalmente unas reservas reguladoras muy importantes en relación a las permanentes. Además los descensos de los niveles piezométricos generan una mayor tasa de recarga.

El sistema en los acuíferos confinados por las coladas basálticas, por el contrario no varía prácticamente, ya que el flujo es sumamente lento. O sea que no existen variaciones a corto plazo a consecuencia de las variaciones climáticas.
Como criterio para cuantificar en forma aproximada el valor de las reservas explotables, se estima que las mismas son 2/3 de las reservas reguladoras, o sea $9{,}3x10^7 m^3$/año. Este valor es una primera aproximación dirigida a una explotación óptima del acuífero, que se debe tomar como referencia en los planes de desarrollo del área.

Superficies potenciométricas

El término superficie potenciométrica, también denominada cabeza hidráulica, se calcula por la interpolación lineal entre la recarga (captación) superficial y el nivel de base local o regional. A los efectos del presente trabajo fue utilizado el nivel del mar (ver secciones). Este valor es medido en los pozos elegidos del área aflorante y en la totalidad del área confinada. El conjunto de estos datos es ploteado en mapas que ilustran la dirección de flujo del agua en el acuífero e inclusive brindan información acerca de su gradiente. Asimismo, en un acuífero confinado en condiciones idealmente homogéneas, esta superficie potenciométrica indica la elevación a la que el agua puede subir en un pozo en una determinada zona. La configuración hidráulica en el acuífero se desenvolvió hacia el Neocretácico (aproximadamente 100 MA), momento en el que se verificaron los mayores levantamientos en las áreas de borde de la cuenca. Estas condiciones en el acuífero que tuvieron inicio en aquella época, perduran hasta el presente.
El área de recarga se presenta en la franja de orientación NS que comienza en la ciudad de Rivera y finaliza en las cercanías de Paso de los Toros.
No existe una serie de medidas históricas donde se pueda reconstruir la evolución de las variaciones piezométricas del Sistema Acuífero. Solamente se registraron medidas a impulsos de proyectos sujetos a los vaivenes de planificaciones políticas que nunca llegaron a concretarse.
No obstante esta información fue utilizada para la confección del mapa piezométrico, donde en primera instancia se puede observar una dirección general de flujo de orientación este-oeste, siendo la región infrabasáltica coincidente con el tránsito hacia una zona de descarga que se encontra-

ría en Argentina. El gradiente hidráulico medio en la zona aflorante tiene un valor de $7x10^{-4}$, mientras que en el área confinada se tienen valores de $2x10^{-4}$ al N y $6x10^{-4}$ al S, lo cual coincide con el mayor espesor del Sistema Acuífero en la dirección NW. Para calcular el caudal que fluye hacia la zona confinada se aplicó la ley de Darcy, para un frente que representa el borde de afloramiento del acuífero, obteniendo como resultado un valor:

$$Q = T \times i \times L = 100 m^2/día. \times 7x10^{-4} \times 160x10^3 m = 4{,}2x10^6 m^3/año$$

Zona de surgencia

A partir del análisis de los datos del mapa piezométrico, resulta claramente una zona de surgencia. Del mismo se desprende un incremento de los niveles de surgencia de Sur a Norte y de Este a Oeste, alcanzando valores entre +35 y +40 metros entre Arapey y la zona de Bella Unión.

Hidrogeoquímica

Para la caracterización hidrogeoquímica se tomaron pozos representativos del área aflorante y confinada del acuífero. La zona aflorante está constituida por la unidad hidrogeológica Rivera y Tacuarembó y la zona confinada por el sistema acuífero Tacuarembó-Buena Vista-Yaguarí y por el sistema San Gregorio-Tres Islas.

Nro. Pozo	Ubicación	Departamento
Area Aflorante		
17	Rivera	Rivera
10	Tranqueras	Rivera
4	Barrio Godoy	Tacuarembó
Area Confinada		
20	Granja Cornelius	Artigas
21	Termas de Guaviyú	Paysandú
22	Termas de Arapey	Salto
2	Paso Ullestie	Paysandú
3	Termas de Almirón	Paysandú
15	Termas de Daymán	Salto

Area aflorante

Se puede establecer que la calidad de las aguas, tanto para la unidad Rivera como para la unidad Tacuarembó, no presenta limitaciones de potabilidad.
El estudio de las relaciones iónicas permitió clasificar a estas aguas como cloruradas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas, según el diagrama de Piper.
En esta zona se destaca la mayor concentración de Ca frente al Na y en algunos casos valores de Mg semejantes o superiores al Na.

$Ca > Na \sim Mg$

Estos valores, relativamente elevados del Ca, se deben posiblemente a la naturaleza de la cementación de la unidad hidrogeológica Tacuarembó, que es ocasionalmente calcárea.
El bicarbonato en algunos casos tiene dominio sobre el cloro, originando las aguas bicarbonatadas cálcicas. El valor medio de la dureza total expresada en $CaCO_3$ es 45mg/l y el valor medio del residuo seco es 120mg/l.
No se encontraron valores de Fe, Mn, F que pudieran comprometer la utilización del acuífero.

Area confinada

Las aguas en esta zona corresponden al sistema hidrogeológico Rivera-Tacuarembó-Buena Vista-Yaguarí (R-T-BV-Y) y al sistema San Gregorio-Tres Islas (SG-TI).
La calidad de las aguas del sistema (R-T-BV-Y) no presenta limitaciones de potabilidad, salvo que se mezclen con aguas del sistema (SG-TI), como es el caso de la perforación de Almirón que presenta un residuo seco de 6344mg/l.
Las aguas se clasifican, según el diagrama de Piper, en bicarbonatadas sódicas para el sistema (R-T-BV-Y), con un valor medio de dureza total de 65mg/l y en cloruradas sódicas para el sistema (SG-TI), con un valor medio de 200mg/l de dureza total. En los dos casos se observa mayor concentración de Na sobre el Ca. Figura 13.

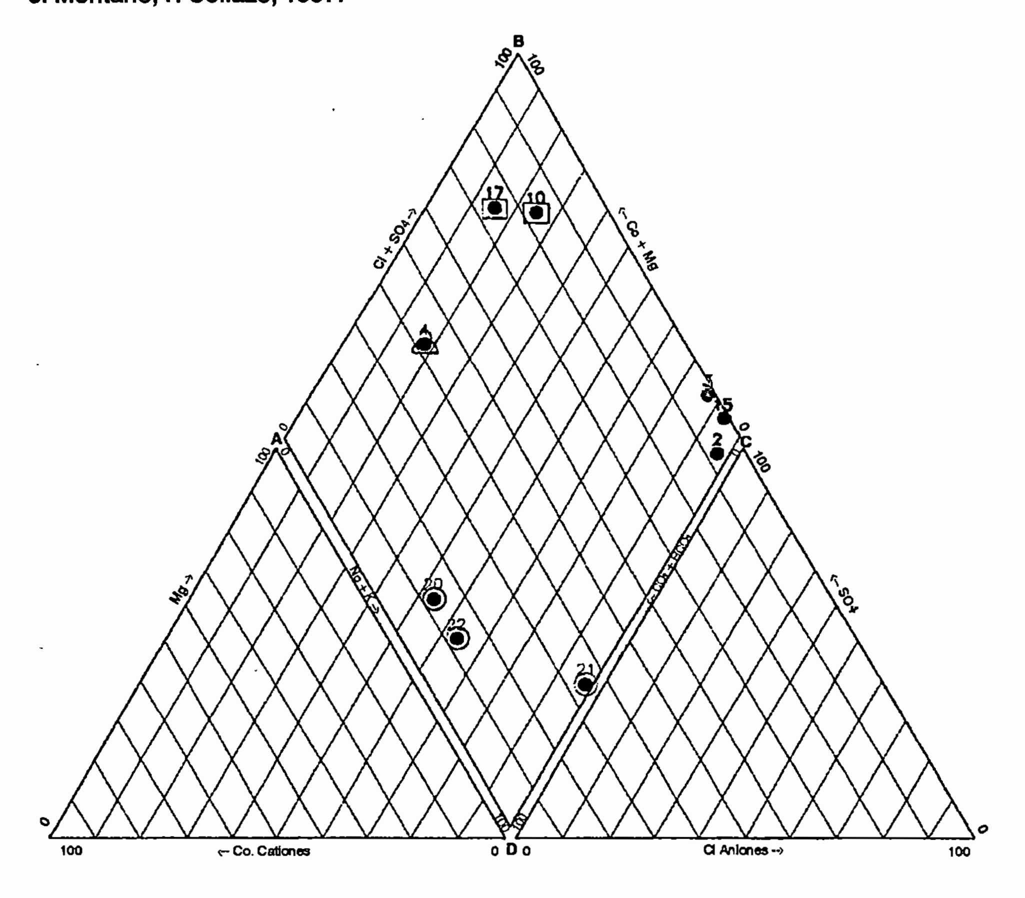
$$Na >> Ca$$

Las aguas pertenecientes al grupo (SG-TI) se corresponden con zonas de altas temperaturas, de fundamental importancia para el desarrollo de centros turísticos termales. Por el contrario la calidad de estas aguas las inhabilitan para el

abastecimiento público, industrial y agrícola, debido al alto contenido de sales, producto de su origen glacio-marino, y al mayor tiempo de contacto con el acuífero debido también a la mayor profundidad. Los pozos Daymán, Paso Ullestie y Almirón son ejemplos claros de aguas captando este sistema acuífero.

Se representan en el mapa hidrogeoquímico, los diagramas de Stiff, de las diferentes captaciones, evidenciándose claramente los distintos sistemas acuíferos. Figura 14.

Figura 13. Diagrama de Piper de análisis de agua.
J. Montaño, P. Collazo, 1997.



Valores en % de miliequivalentes por litro.

Clasificación:

Clorurada cálcica: Rivera (17), Tranqueras (10)

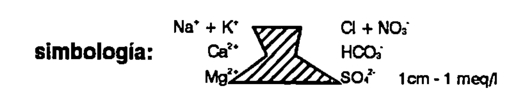
Bicarbonatada cálcica: Barrio Godoy (4)

Bicarbonatadas sódicas: Granja Cornelius (20), T. Guaviyú (21), T. Arapey (22)

Clorurada sódica: Paso Ullestie (2), Almirón (3), Daymán (15)

Figura 14. Mapa Hidrogeoquímico.
J. Montaño, P. Collazo, 1997.

Monte Caseros
Granja cornelius
Artigas
Cerro
Rivera
Rivera
Termas Arapey
Tranqueras
Concordia
Salto
Termas del Daymán
Termas Guaviyú
Tacuarembó
Barrio Godoy
Termas Almirón
Paisandú
Paso Ullestie



Evolución de las características constructivas de pozos profundos

Introducción

La experiencia de 60 años en el aprovechamiento del área confinada del Acuífero Guaraní (Tacuarembó), en el Uruguay, ha pasado por tres períodos diferentes caracterizados por la evolución en el uso del recurso así como en los proyectos constructivos de las perforaciones ejecutadas.

Este mismo proceso en la República Argentina, tiene un origen más reciente; comenzó en la década del '90, con la primera obra realizada en la localidad de Federación (1994-1995).

Este desfasaje en el comienzo del aprovechamiento del recurso entre ambas márgenes del Río Uruguay, obedece al proceso de descubrimiento del acuífero en profundidad en el Uruguay, y a la carencia de información geológica equivalente en la margen argentina, ante la hipótesis mantenida por algunos de que el Río Uruguay obedecía a un fallamiento con movimiento vertical de bloques, lo que hacía presumir que el acuífero no estaría ubicado en situación topográfica similar a la margen uruguaya.

Al constatar en 1994 que el paquete acuífero en la margen argentina se ubica a profundidades similares a las de la margen uruguaya, da comienzo al rápido surgimiento de proyectos de perforaciones profundas con fines termales en varias localidades de la provincia de Entre Ríos (Argentina), como es el caso de Federación, Concordia, Colón y Villa Elisa.

Pozos

Se ha verificado de esta forma un aumento del número de obras de captación a lo largo del período 1990-97, y el surgimiento de diferentes alternativas en el aprovechamiento del agua termal en los últimos siete años.

El Acuífero Guaraní, principal fuente de agua subterránea en el Uruguay, ha sido explotado en la región NW del país, desde la década del '30, donde fue descubierto el recurso. Hasta la actualidad esa explotación ha sido incipiente, muy por debajo del potencial de producción estimado para dicha área; pero en los comienzos de la década del '90 un nuevo empuje al aprovechamiento del recurso ha llevado a la construcción de una serie de pozos que hoy se hallan en producción, concentrados en un área reducida, a ambas márgenes del Río Uruguay.

La tendencia creciente en la ejecución de pozos profundos para aprovechamiento del agua termal en el área, la obtención de nueva información proveniente de las obras realizadas, que aumenta el grado de conocimiento sobre las características del acuífero, son eventos importantes que determinan la necesidad de comenzar a estudiar en forma sistemática el comportamiento del acuífero.

Desde la década del '30 se han llevado a cabo 17 perforaciones, la mayoría de ellas con fines de exploración y estudio de petróleo; a la fecha existen en explotación 10 pozos profundos, 7 de los cuales fueron construidos en los últimos cinco años.

La Figura 15 muestra la ubicación y distribución de pozos profundos en el NW uruguayo.

Los objetivos para la ejecución de las obras desde el punto de vista de su aprovechamiento fueron variados, pero en la actualidad el 87% de los pozos realiza un aprovechamiento del agua termal con fines recreativos y terapéuticos, y el restante 12% lo hace para el abastecimiento público.

Los perfiles constructivos de los pozos profundos han ido variando a través del tiempo en función de los fines buscados para las perforaciones, así como por el avance en los conocimientos de la geología del área y del comportamiento del acuífero.

Los pozos realizados en los últimos cinco años, llevados a cabo con un criterio definido hacia el aprovechamiento del agua termal, han aportado un volumen grande de información, que representa un avance importante en el conocimiento de la geometría, geología y comportamiento hidráulico del acuífero.



Figura 15. Ubicación de los pozos profundos en el NW uruguayo.

Brasil
Artigas
Rivera
Tacuarembó
Salto
Argentina
Paysandú
Río de la Plata
Montevideo
31°
33°
35°
55°
57°
0 50 100km

- ● Perforaciones que atraviesan totalmente la Secuencia Tr- J.
- o Perforaciones de penetración parcial
- Límite de la cuenca

1 Guaviyú
2 Daymán
3 OSE Salto
4 Parque del Lago
5 Federación E.Ríos
6 Arapey
7 Belén
8 Gaspar
9 Itacumbú
10 Yacaré
11 Pelado
12 Artigas

La información presentada en este trabajo es un resumen de los avances en el conocimiento y en la explotación del acuífero, que pueden ser de utilidad en el manejo futuro del mismo, en la toma de decisiones y en la elaboración de nuevos proyectos de pozos profundos para el aprovechamiento del recurso en la región.

Caudales de surgencia de los pozos en explotación

Desde 1960 hasta 1990 la extracción de las perforaciones infrabasálticas, según estimaciones, se ubicó próxima a los 10M/m^3/año. A partir de 1992, a consecuencia de las nuevas perforaciones realizadas, aumentó a 11,5M/m^3/año; en el año 1995 la misma se elevó a 15M/m^3/año y para 1997, se prevé una extracción próxima a 19,5M/m^3/año.

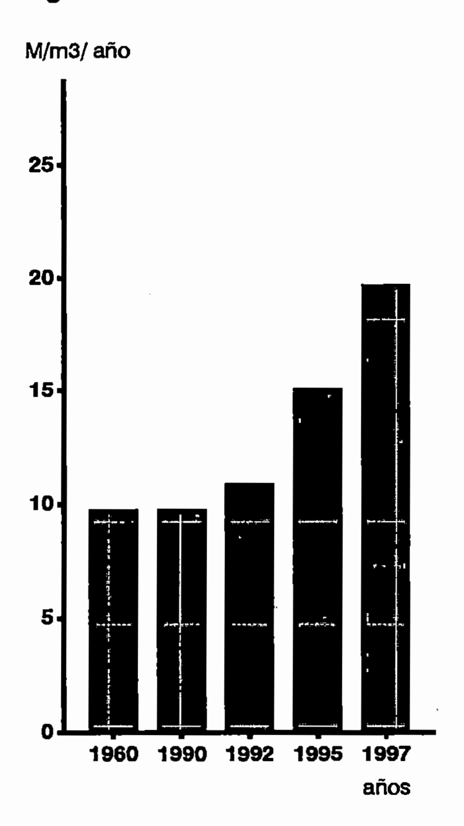
Arapey	800 m^3/h	
Federación	450 m^3/h	(*)
Daymán	280 m^3/h	
Hotel Quiroga	300 m^3/h	(*)
Concordia	200 m^3/h.	(**)
Colón	130 m^3/h.	
Guaviyú	125 m^3/h	
San Nicanor	100 m^3/h	
O.S.E.	90 m^3/h	(*)

(*) Los caudales corresponden a perforaciones completadas con filtro y prefiltro.

(**) Caudal estimado, no confirmado por los autores del presente trabajo.

Como se puede ver en la Figura 16, la descarga se ha duplicado en el período entre 1990 y 1997, con la puesta en producción de 7 nuevos pozos y la recuperación de 2 ya existentes (Daymán y Guaviyú).

Figura 16. Evolución de la extracción en el período 1960-97.



Sobre fines de 1995 comenzó una nueva etapa en la región, la cual deberá ser estudiada ya que se puso en explotación bajo régimen de bombeo el pozo ubicado en la ciudad de Salto (O.S.E.), con lo cual su caudal de surgencia de $90m^3/h$, fue elevado, por bombeo, a $410m^3/h$.
Esta nueva etapa permitirá ampliar los conocimientos respecto a la hidráulica del acuífero y su respuesta a esta nueva condición. Hasta el momento no se han podido constatar eventos de interferencia entre la única perforación sometida a bombeo y los pozos más próximos a la misma, pero es importante mencionar que no se han realizado mediciones sistemáticas respecto a la evolución hidráulica en el área.

Hidráulica

En la Tabla 1 se exponen los resultados de la evolución de algunos de los parámetros hidráulicos de los pozos en producción, a lo largo del período considerado.

Tabla 1. Parámetros hidráulicos de las perforaciones en uso.

País	Pozo	Año	NE m	Q m^3/h	PR kg/cm^2	ND m	m	Q esp $m^3/h/m$	Temp. °C	Esp. Explorado	Observaciones
Uruguay	Arapey	1942	56	(800)							
		1985	42	xxx	3,1	31	11	15	38,5	703	
		1995	40 (•)	115	3,5	35	5	23	39		
	Daymán	1957	87	(550)							
		1988	32	120	1,4	14	18	6,7	45,8	5,31	Entubado el basalto
		1991	77	280	0,5	5	72	3,89	47		
		1995	54 (•)	114	3,1	31	23	5	47		
	Guaviyú	1958	xxx	(450)					39	240	Entubado sedimento
		1985	15,5	90	0,4	4	9,5		39		superior (110 m)
		1992	40	125				3,15			
	OSE-Salto	1991	50	110				2,2	47,5	300	Pozo libre, caudal surgente
		1992	55	90					48		Pozo con filtros, caudal surgente
		1992	55	355			(-170)	1,58	48		Caudal con bombeo
	S. Nicanor	1992	54	100				2,2	44	300	Pozo libre
	Salto. Gde.	1995	62	250				4	45	325	Pozo con filtros, surgente
Argentina	Federación	1994	59	450				7,6	41,5	448	Pozo con filtros, surgente

Nota: NE. Presión a válvula cerrada
(•) Lectura de presión inmediata al cierre de válvula

Q. Caudal
PR. Presión Residual
Q esp. Caudal específico

Como se observa, existe gran variación en el caudal de surgencia de los distintos pozos, presentando valores que van desde 120 a 800m^3/h. Esto se puede asociar a condiciones puntuales del acuífero, a diferencias de nivel topográfico, al espesor explorado de los sedimentos de la arenisca productora, así como también a ciertas características constructivas que pueden determinar pérdidas de carga adicionales.
Los caudales específicos se ubican por debajo de 10m^3/h/m, en casi todos los casos, excepto en el pozo de Arapey, que muestra un comportamiento diferente, con un caudal específico en el entorno de los 20m^3/h/m.
En dos de los pozos, O.S.E-Salto y Salto Grande, existe información de ensayos de bombeo con bomba, la cual está en etapa de proceso y análisis, y forma parte de un estudio hidráulico más detallado cuyos resultados no se hallan disponibles aún.

Equipos de perforación

El factor profundidad en estas obras es determinante en las características de los equipos involucrados en las perforaciones. En todos los casos se trata de maquinaria de gran porte, con capacidad operativa igual o superior a los 1.500m.
Es una característica general que tanto el equipamiento como la tecnología aplicada a este tipo de pozos se deriva, en una u otra forma, de la utilizada en la prospección de petróleo. Es así que los materiales aplicados a las obras se ajustan casi en su totalidad a los patrones de calidad de la industria del petróleo y a las distintas normas de calidad utilizadas en esta disciplina.
Es preciso mencionar que en las últimas décadas se han desarrollado tecnologías de aplicación específica a la captación de agua subterránea en acuíferos profundos, producto de la investigación y del creciente desarrollo en la explotación del recurso.
En el área, principalmente Brasil es quien más experiencia ha desarrollado en pozos en este acuífero, debido al gran número de perforaciones profundas realizadas en el estado de Sao Paulo. De esta manera cuentan en la actualidad con un número considerable de empresas de perforaciones con vasta experiencia en la realización de pozos profundos para captación de agua del Acuífero Guaraní.
En Uruguay, en la década del treinta, fue el propio Estado, a través del Instituto Geológico del Uruguay que con equi-

pos de perforación propios derivados de la investigación geológica, ejecutó la primera perforación en el área confinada de este acuífero. En la década del cincuenta, a través de contratos con empresas norteamericanas, se realizaron varias perforaciones profundas, aunque el objetivo era la prospección de hidrocarburos y no la explotación del acuífero, que en forma indirecta, fue el destino que siguieron algunas de dichas perforaciones que aún hoy se encuentran en producción. En los años noventa fueron contratadas empresas brasileñas de perforación, las que realizaron los primeros pozos profundos, cuyo objetivo específico fue la captación de agua subterránea, por debajo de los derrames basálticos. A partir de ese momento es que los proyectos constructivos fueron adaptados a la captación de agua; introduciendo modificaciones en las operaciones de perforación (utilización de lodos a base de productos no agresivos a la calidad de agua del acuífero) como también en aspectos constructivos (instalación de columna de producción con tubos filtros y empaque de gravas).

En Argentina la ejecución de las obras recientes es realizada por empresas extranjeras (Brasil) y nacionales; en este caso el país posee un gran número de empresas de perforación de pozos profundos que operan básicamente en el área de la prospección de hidrocarburos. En la actualidad, en razón de los primeros resultados positivos logrados en búsqueda de agua termal proveniente del Acuífero Guaraní, existe un traslado de equipos de perforación desde las áreas petroleras y de prospección profunda, con destino a la realización de proyectos en el área del acuífero. Tales son los casos de los pozos de las localidades de Colón y Villa Elisa (Entre Ríos).

Períodos en el desarrollo de los pozos profundos

Primer período (1935-1960)

La ejecución de la primera perforación profunda, que alcanza al Acuífero Guaraní en su sector confinado al NW del Uruguay, se remonta al año 1935. Se trata de la perforación No. 210, ejecutada por el I.G.U. (Instituto Geológico del Uruguay), con financiación de ANCAP; tenía por objetivo la investigación estratigráfica. En ella se realiza una penetración parcial del sistema acuífero, que alcanza su techo a los 540m de profundidad y que manifiesta una potencia de 954m. La napa de agua surgente alumbrada a los 540m manifestó su mayor potencial hasta los 820m y presentó las siguientes características:

Caudal	$800 m^3/h$ (surgente)
N.E.	5,6 kg/cm^2
temperatura	39ºC

Posteriormente la empresa del Estado encargada de los combustibles, ANCAP, en la década del '50, llevó adelante una campaña de prospección de hidrocarburos en la cuenca NW, en la cual actúa la empresa norteamericana De Golyer and Mc Naughton Inc.; durante la misma se realizaron una serie de perforaciones, entre las que se encuentran: Quebracho (Guaviyú), Salto 1 (Daymán), Gaspar y Artigas 2.
No fue exitosa la búsqueda de hidrocarburos, pero se afirmaron los conocimientos sobre la existencia de un recurso de aguas subterráneas muy importante en la región. De esa época, sólo tres de los pozos que habían alcanzado el Acuífero Tacuarembó quedaron en producción: Arapey, Daymán y Guaviyú.

Segundo período (1960-1990)

En los primeros años de la década del '60, los municipios de Salto y Paysandú se hacen cargo de las tres perforaciones citadas, y comienzan el desarrollo del termalismo con fines turísticos y terapéuticos.
Es así que esos pozos se mantienen en producción y el agua es aprovechada en centros recreativos construidos en su entorno.
En 1985 ANCAP realiza un reestudio de la cuenca NW construyendo cuatro nuevas perforaciones que aumentan el caudal de información sobre el acuífero. Ellas son: Belén, Itacumbú, Yacaré y Pelado.
Hasta el momento todas las perforaciones habían perseguido un fin de estudio, ya sea para el conocimiento de la estratigrafía o la búsqueda de hidrocarburos; pero ninguna había tenido por objetivo final el aprovechamiento del agua del importante sistema acuífero atravesado.

Tercer período (1990-1997)

En 1990, la empresa de aguas y saneamiento del estado uruguayo (O.S.E.), en conjunto con los municipios de Salto y Paysandú, encaran un proyecto para ejecutar, en la ciudad de Salto, una perforación profunda para la utilización de agua del Acuífero Tacuarembó con fines de abastecimiento público, recuperar el pozo termal de Daymán y

realizar un nuevo pozo en las Termas de Almirón (situada fuera del área del acuífero Tacuarembó).
La ejecución de las obras estuvo a cargo de la empresa brasileña C.P.R.M. (Companhia de Prospecçào de Recursos Minerais).
El pozo profundo de O.S.E. fue el primero en la región, cuyo diseño constructivo estuvo orientado hacia la captación de agua potable, y se revistió con tubería en su totalidad.
El pozo de Daymán fue entubado en toda la sección de basaltos (955m) para evitar las fugas que existían en forma horizontal, a través de fisuras en la roca, que habían causado una importante disminución en la presión y caudal. El entubamiento del pozo fue acompañado de una recuperación en los parámetros mencionados.
En 1992 se llevó a cabo un nuevo pozo, a 22km de la ciudad de Salto, ubicado en un establecimiento agropecuario, San Nicanor. Fue construido para aprovechamiento de agua termal, con fines recreativos. Realizado por inversor privado, la obra la ejecutó la empresa brasileña CONTEP.
En 1994 surgen dos nuevos emprendimientos destinados a la explotación del recurso. Un proyecto privado, llevado a cabo por el Hotel Horacio Quiroga, a orillas del parque del lago de la represa de Salto Grande, destinado al uso del agua termal con fines turísticos, ejecutado por la empresa CONTEP; y el otro realizado por el Municipio de Federación en la Provincia de Entre Ríos - Argentina, ejecutado por las empresas B.P.S Austral (Argentina) y Acevedo y Travasos (Brasil). Esta perforación fue la primera realizada en la margen derecha del río Uruguay con fines de aprovechamiento del agua termal del Sistema Acuífero Guaraní.
En 1996, dos nuevos proyectos son ejecutados en la región: el de la ciudad de Concordia y el de la ciudad de Colón, ambos en la provincia de Entre Ríos (Argentina).
Sobre fines de 1996, principios de 1997 se realizó un nuevo pozo, en la localidad de Villa Elisa, próximo a la ciudad de Colón en Argentina, (de esta obra por su reciente realización, no disponemos de información precisa sobre las características constructivas y parámetros hidráulicos de la misma).
Desde 1994 a la fecha, las perforaciones realizadas han tenido como objetivo el aprovechamiento del recurso con fines turístico termales.

Evolución constructiva de las perforaciones en uso

Las perforaciones que han sido utilizadas para aprovechamiento de agua a lo largo del período considerado, tal como se observa en la Figura17, muestran tres tipos de perfiles constructivos básicos.

Las perforaciones más antiguas, como ya se dijo, presentan un perfil que es adecuado a los fines buscados en el momento de su ejecución, el cual se puede resumir en un pozo de 10 5/8 pulgadas de diámetro, entubando solamente los primeros metros desde la superficie.

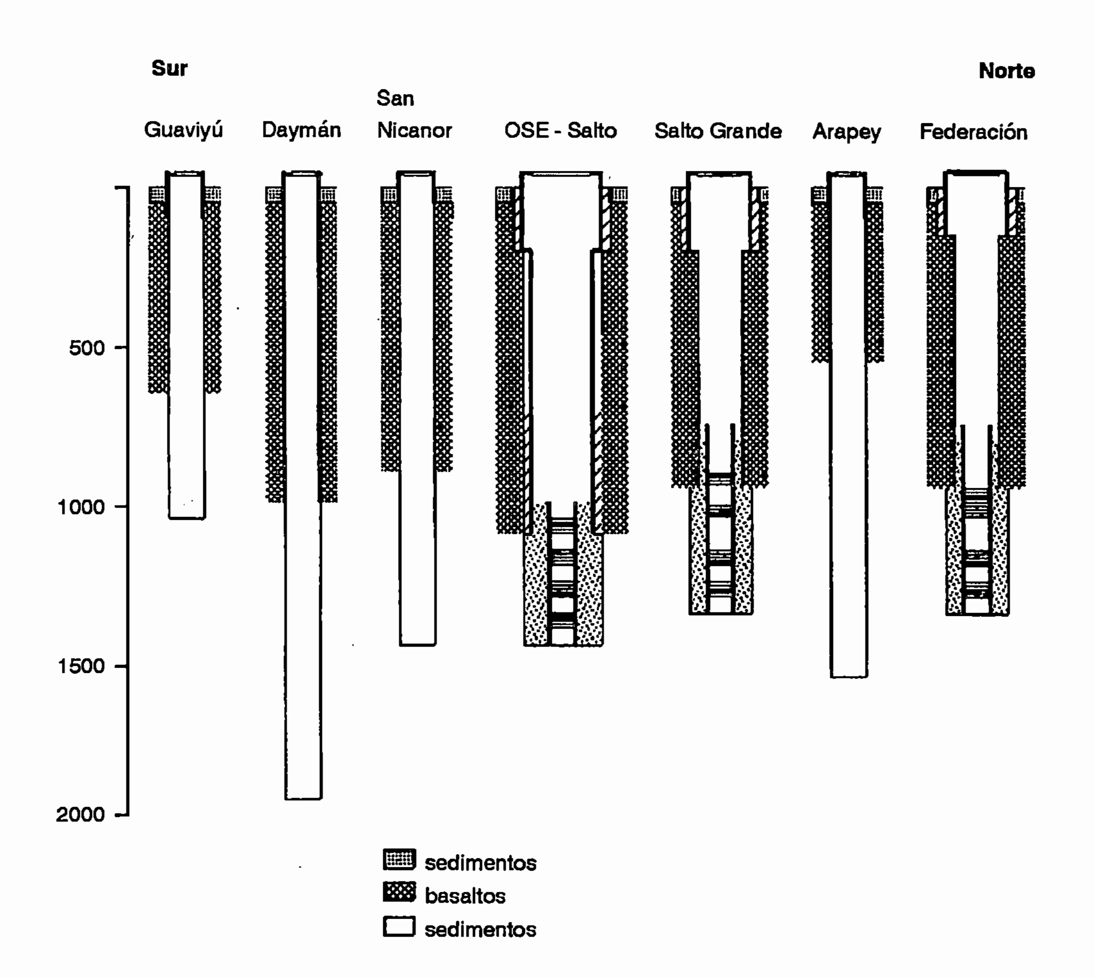
Con la ejecución de la primera perforación con fines específicos de aprovechamiento de agua, las características del perfil constructivo evolucionaron para adecuarse al objetivo, de manera de proveer condiciones de máxima eficiencia de obtención del mayor potencial productivo del acuífero y de brindar las mejores posibilidades de protección, tanto de la obra en cuanto a su vida útil, como también del acuífero.

Así el pozo OSE-Salto fue entubado totalmente (Figura 18) y contempló la inclusión de una cámara de bombeo y filtros; modificación sustancial con respecto a los proyectos de los pozos realizados hasta ese momento.

Las perforaciones más recientes, 1994-95, realizadas también con fines de utilización del agua termal, muestran en sus perfiles constructivos el resultado de una ecuación que buscó maximizar dos variables, el máximo potencial de extracción de agua y el menor costo de obra. Como se

puede observar en ambos casos fue considerada la necesidad de una cámara de bombeo, la instalación de filtros y empaque de grava, lo cual está asegurando mediante bombeo, la obtención de caudales superiores a los de surgencia natural y además prevé la evolución futura de los niveles estáticos.

Figura 17. Perfiles Constructivos. Pozos Profundos.

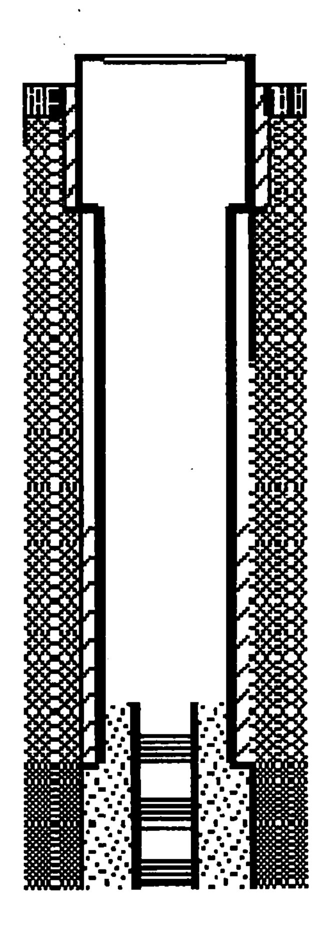


La sección de basalto en los pozos de Salto Grande y Federación, desde los 120-200m de profundidad y hasta el contacto con el techo del acuífero no fue revestida, aprovechando el comportamiento del basalto, que en gran parte del perfil no presentó problemas de estabilidad, lo cual derivó en costos menores de obra, si bien en ambos casos la columna de tubos de producción debió prolongarse dentro

del basalto, cubriendo áreas específicas muy inestables, que presentaron importantes desmoronamientos durante la perforación, impidiendo de esta forma la ocurrencia de obstrucciones por caída de bloques, durante la vida útil de las obras.

Las perforaciones de Colón y Villa Elisa no fueron revestidas con tubería en la sección basáltica ni se les instaló filtros a nivel del acuífero; lo segundo, si bien reduce los costos de obra, reduce también las posibilidades potenciales de obtención de agua, limitándolas básicamente a la surgencia natural, ya que la extracción mediante bombeo se ve limitada por el alto porcentaje de arrastre de sólidos en suspensión, que se verifica en el acuífero cuando se realiza bombeo en perforaciones que no poseen filtros y empaque de gravas.

Figura 18. Pozo OSE, Salto.



Criterios básicos para los proyectos constructivos

Llevar a cabo un pozo productivo en este tipo de acuífero no se limita a perforar exclusivamente sino que se debe tener en cuenta las características constructivas que presentan, como: la profundidad a la que se ubica, las características geológicas que determinan, desde el punto de vista constructivo, ciertas ventajas y también algunos problemas a resolver. Los estudios previos, la elaboración de un correcto proyecto constructivo y fiscalización de la obra con técnicos experimentados, ocupan un lugar importante y forman parte de elementos a tener en cuenta para alcanzar el éxito, tanto en lo que refiere a la obra de ingeniería, como a los costos involucrados en dicho emprendimiento.
Los proyectos de perforaciones profundas en el área confinada del acuífero Guaraní, en ambas márgenes del río Uruguay, han mostrado diferencias sustantivas en los perfiles constructivos de los pozos, pero de la interpretación de los resultados obtenidos de los mismos, ponderados por el comportamiento observado en los diferentes estratos geológicos atravesados, es posible obtener importante información que permite mejorar los proyectos constructivos, optimizar sus características, con un mejor aprovechamiento del potencial productivo de este acuífero en la zona.
Esquematizando los perfiles constructivos de los pozos infrabasálticos, podemos distinguir tres sectores básicos:

Un *primer sector,* que comprende la parte más próxima a la superficie, abarcando las areniscas superficiales y las primeras coladas de basalto, con una profundidad que puede variar de acuerdo al proyecto entre 50 y 250m. En este sector se deberá dar respuesta a dos situaciones, por un lado debe contemplar un diámetro suficiente para permitir la instalación de un equipo de bombeo dentro del pozo, si fuera necesario, ya sea por la obtención de un caudal de surgencia pobre, o para garantizar la extracción de agua en un volumen suficiente a los fines buscados, de forma de obtener el caudal conveniente que permita una buena relación costo-beneficio de la obra. En los casos que la surgencia natural sea importante desde el inicio de la explotación, la existencia de dicha cámara de bombeo ofrece una garantía a futuro, que permitirá compensar posibles descensos en la piezometría, como respuesta del acuífero al aumento de la extracción en la zona.
Si bien este proceso puede ser lento en el tiempo, no debemos desconocer que la vida útil de estas obras es larga, como lo prueban pozos que están en producción hace más de treinta años y presentan perfectas condiciones del punto de vista constructivo e hidráulico, y que de mantenerse el actual ritmo de construcción de nuevas perforaciones, el proceso referido puede en alguna medida verse acelerado.
Por otro lado, es importante prevenir y controlar las posibles fugas de agua, a nivel de fisuras en el basalto ubicadas próximas a la superficie que, como fuera comprobado (en el pozo de Daymán), son causa de disminución importante en el caudal y presión del pozo. El encamisar la cámara de bombeo con tubería y cementar el espacio anular entre ésta y las paredes del pozo, garantiza la canalización total del agua hasta la superficie, eliminando las fugas horizontales. Y por otro lado ofrece una zona adecuadamente protegida para la instalación y operación del equipo de bombeo.
Un *segundo sector,* que podemos nombrar pozo de acceso, se corresponde con el perfil del pozo desde el final de la cámara de bombeo, hasta alcanzar el techo de la arenisca infrabasáltica, o sea donde comienza el acuífero. Esta zona del pozo, que se corresponde litológicamente con las sucesivas coladas de basalto, de acuerdo con la información obtenida de los pozos existentes, ha mostrado gran estabilidad de la pared del pozo, aún en las áreas fracturadas, observándose este comportamiento estable a lo largo del tiempo, como lo testifican los pozos más antiguos (Arapey, Daymán,

Guaviyú), que no han sufrido desprendimientos importantes u obturaciones en este tramo, por un período de operación de más de 30 años. Al dejar sin revestir este sector se obtiene una disminución importante en el costo de la obra, no sólo en cuanto al ahorro por la tubería y cementación que no será necesario instalar, sino también porque el diámetro de perforación de este sector puede ser menor que el que sería necesario, si fuese a instalarse tubería, con lo cual se consigue un ahorro adicional en el coso de la obra. La inestabilidad que se ha registrado en algunas zonas muy fracturadas, próximas al acuífero, puede ser controlada prolongando dentro del basalto el revestimiento de la columna de producción a instalar frente al acuífero.

Si bien este punto es seguramente el que podrá mostrar mayor margen de variación entre diferentes proyectos, es posible mencionar, a la luz de la información disponible de las obras existentes, algunas particularidades encontradas que podrán ser tenidas en cuenta para la elaboración de nuevas perforaciones.

Por un lado está claro que en el área el basalto atravesado durante la perforación se comporta bastante bien, en cuanto a la estabilidad de las paredes, en un pozo descubierto. Pero se han detectado hasta el momento dos tipos de problemas concretos en estos sectores, que merecen cierta atención. Uno de ellos es la presencia observada de fugas de agua ocurridas en un pozo (Daymán) a través de niveles de fracturas en el basalto, en la zona más próxima a la superficie. Esto provocaba disminución de presión en el pozo y pérdidas en el caudal de surgencia. Si bien este evento puede ser corregido mediante encamisado con tubería en el área afectada (como fue realizado en el pozo de Daymán), esta tarea presupone altos costos adicionales; con lo cual creemos que el hecho debe ser estudiado durante la etapa de proyecto, ya que puede prevenirse, evitando gastos importantes en el futuro de la captación.

El otro problema a nivel del basalto fue observado en varios pozos (Federación, Salto Grande, O.S.E-Salto) y se trata de la presencia de niveles altamente fracturados, que se ubican debajo de los 500m de profundidad y son causa de importantes desmoronamientos de bloques, durante la perforación y que pueden comprometer la estabilidad de los pozos en su etapa de producción.

Esta situación puede requerir de operaciones adicionales durante la perforación o en el encamisado, que seguramente se reflejarán en un incremento en los costos finales

de las obras, pero que estarán asegurando un buen comportamiento de la estructura a lo largo de su vida útil y que de no tenerse en cuenta, pueden provocar daños irreparables en la obra, o la necesidad de realizar inversiones considerables, para corregir los problemas de desmoronamientos y obturaciones en el pozo.

En los casos de los pozos mencionados, tal situación fue resuelta previamente a nivel del proyecto, con la inclusión de tramos adicionales de tubería que controlan las áreas problemáticas.

El *tercer sector* se corresponde con el tramo perforado dentro de la arenisca productora (acuífero) en el cual debemos referirnos a la instalación o no de tubería filtro y empaque de gravas (prefiltro), que en cierta forma también se halla relacionado a la cámara de bombeo.

No podemos desconocer el excelente comportamiento que presentan las paredes de los pozos en el sector del acuífero, el material es autoportante, y no se verifican colapsos o desmoronamientos en el perfil de la arenisca al descubierto. Prueba de ello ha sido el comportamiento verificado en pozos antiguos como ser Arapey, Daymán o Guaviyú. Pero es de resaltar también que la arenisca en un pozo recién perforado y puesto en producción libera con la surgencia inicial, altos tenores de sólidos en suspensión, que se corresponden con el material fino y friable de la formación; de esta manera se produce un desarrollo natural, en los primeros tiempos de surgencia, que permiten alcanzar un equilibrio entre el caudal que sale por surgencia natural y la resistencia de la formación al arrastre de finos. Ese equilibrio alcanzado requiere de mayor o menor tiempo de desarrollo, dependiendo de varios factores, como ser: el caudal de surgencia, la presión del pozo, la ubicación del pozo en la región, que determina el espesor relativo de la porción más friable del paquete acuífero.

Este proceso obtenido a través del desarrollo, que al final elimina o reduce a niveles aceptables el arrastre de sólidos desde la formación, se mantiene en equilibrio para el caudal con el cual fue realizado el desarrollo, o sea el de la surgencia en este caso. Por lo tanto, de provocarse una perturbación adicional, como sería en el caso de instalar una bomba, esto provocaría un nuevo desequilibrio en las paredes del pozo, que iría acompañado de un nuevo estadio de liberación de finos desde la formación, ello podría requerir de un nuevo proceso de desarrollo para su control. De esta forma se podrían provocar daños en el equipo de

bombeo instalado, por la cantidad de arena bombeada o incluso llegar a impedir el funcionamiento de la bomba, por acumulación de arena en los rotores de la misma.
Sin duda no podemos dejar de decir que, desde el punto de vista constructivo, una perforación que esté revestida en toda su longitud con filtros y prefiltro brinda la mejor garantía de duración y comportamiento, siempre que los materiales sean de calidad adecuada a las profundidades alcanzadas, a las condiciones de terreno y a la calidad del agua a extraer. Pero esto supone también un costo de obra muy alto. Es por eso que las características presentadas por el subsuelo en el área considerada permiten llegar a perfiles constructivos de pozo, con menor empleo de revestimientos, lo que determina costos de obra menores, pero se mantiene el nivel de confiabilidad en el comportamiento de la perforación.

Conclusiones

• En Uruguay el Acuífero Guaraní tiene una reserva de $5,8x10^{10}m^3$, convirtiéndose en el mayor reservorio de agua dulce descubierto hasta el momento. Este volumen es realimentado aproximadamente por una tasa media anual de $1,4x10^8m^3$ /año, representando el potencial renovable que circula por el acuífero.

• La explotación con pozos puede alcanzar caudales cercanos a los $800.000m^3/h$ a $1.000.000m^3/h$, transformándose en una de las fuentes hídricas con capacidad para sostener emprendimientos de abastecimiento público, riego, fábricas, secado de grano, amortiguación de heladas, etc.

• En el litoral Norte, las aguas varían entre 33ºC a 45ºC con caudales surgentes de $100m^3/h$, convirtiéndose la zona en el sector turístico fuera de temporada más pujante del país, y si lo integramos con el litoral Argentino, se prevé que se transforme en el corredor Termal más importante de Sudamérica.

• La calidad del agua, tanto de la unidad Rivera como de la unidad Tacuarembó, correspondientes al área aflorante, no presentan limitaciones de potabilidad, clasificándose en cloruradas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas según el diagrama de Piper. En la zona confinada son bicarbonatadas sódicas existiendo una ganancia iónica marcada. Además de constituir un sistema hidráulico unidos a los niveles permeables de la Formación Yaguarí y Buena Vista que se

refleja en la calidad del agua. No ocurre lo mismo con el sistema hidrológico San Gregorio-Tres Islas, correspondiente al área confinada, que su alto contenido de sales la inhabilitan para el abastecimiento público, industrial y agrícola. Las aguas pertenecientes a este sistema se clasifican según el diagrama de Piper en cloruradas sódicas.

• La construcción de cada perforación debe ser precedida de un proyecto y fiscalización que persiga la mayor eficiencia de las obras principalmente en estos casos donde la profundidad es mayor a los 1000m. Al realizar ahorros en esta etapa, la experiencia demuestra los altos costos económicos que genera la realización de la obra. Se debe evaluar cuidadosamente la conveniencia de utilización de filtro y prefiltro y los riesgos de su no colocación.

Bibliografía

ANCAP, 1991. Estudio del Sector Noroeste de la Cuenca Norte. Montevideo.

Andreis, R. 1991. Características deposicionales de la Formación Tres Islas. UNESCO. Uruguay.

Bossi, J. 1966. Geología de Uruguay. Universidad de la República Oriental del Uruguay. (UDELAR).

Bossi, J. y R. Navarro. 1988. Geología del Uruguay. Departamento de Publicaciones. UDELAR. Universidad de la República. Montevideo - Uruguay.

Caorsi y Goñi. 1958. Geología del Uruguay. Instituto Geológico del Uruguay. Boletín Nro. 38. Montevideo. Uruguay.

Cattaneo, O. 1992. Experiencias sobre manejo del acuífero infrabasáltico en Uruguay y su proyección dentro de los países del Mercosur. O.S.E. Congreso Hidrogeológico Latinoamericano, Mérida - Venezuela.

Custodio, E. & Llamas, M. 1983. Hidrología Subterránea. 2da. Edición, Editorial Omega, Barcelona - España.

Da Silva, J. 1984. Bioestratigrafía preliminar del Paleozoico Superior. Conferencia en el Centro de Estudios Naturales. Resumen. Uruguay.

De Santa Ana, H. 1989. Consideraciones tectónicas y deposicionales de la cuenca norte uruguaya. ANCAP.

DINAMIGE, 1980. Carta Geológica del Uruguay, escala 1:500.000. 2da Edición.

Elizalde, G., et al. 1970. Carta Geológica del Uruguay. Escala 1:100.000. Departamento de Publicaciones. UDELAR. Boletín Nro. 3. Montevideo.
Elizalde, G. 1973. Contribution à l'etude de la mineralogie et de la sedimentologie du Gondwana uruguayen. Tesis Tercer Ciclo. Universidad de Paris-Sud, Orsay, Francia.
Elizalde, G. 1967. A contribution to the study of Yaguarí Formation. I Simposio Internacional de Estratigrafía y Paleontología del Gondwana. Guía de Excursión. Nro. 3. pág. 51-56.
Falconer, R. 1930. Terrenos Gondwánicos del Departamento de Cerro Largo. Instituto Geológico del Uruguay. Boletín Nro. 12. Montevideo. Uruguay.
Falconer, R. 1931. Terrenos Gondwánicos del Departamento de Tacuarembó. Instituto Geológico del Uruguay. Boletín Nro. 15. Montevideo. Uruguay.
Fernández, A. y J. Ledesma. 1974. Criterios petrográficos de correlación en secuencias de coladas basálticas. XXVIII Congreso Brasilero de Geología. Porto Alegre. Brasil.
Ferrando, L. y R. Andreis. 1982. Sobre la existencia de Triásico en el Departamento de Cerro Largo, Uruguay. Resumen. Reunión Paleozoico Superior. UNESCO. Montevideo, Uruguay.
Ferrando, L. y R. Andreis. 1986. Nueva estratigrafía en el Gondwana en el Uruguay. I Congreso Latinoamericano de Hidrocarburos. ARPEL. Buenos Aires. Argentina. pág. 295-323.
Ferrando, L.A. y J. R. Montaña. 1987. Hipótesis Preliminar sobre la evolución Paleogeográfica de la Cuenca de Paraná en el Uruguay. Actas del III Simposio Sul-Brasileiro de Geología, Curitiba. Vol.1: 393-400.
Ferrando, L. A., R. R. Andreis y J. R. Montaña. 1987. Estratigrafía del Triásico-Jurásico Uruguayo en la Cuenca de Paraná. Actas del III Simposio Sul-Brasileiro de Geología, Curitiba. Vol. 1: 373-378.
Gilboa, Y. 1982. Salto, pozo profundo en las Areniscas Tacuarembó, solución para el abastecimiento de la ciudad. TAHAL, O.S.E, 44p.
Goñi, J. y P. Delany. 1961. Estudio estadístico dos minerais pesados da formaçao Botucatú. Boletín de la Universidad de Paraná Nro. 6. pág. 1-27. Curitiba.
Goso, C. 1995. Análise Estratigráfica da Formaçao San Gregorio na Borda Leste da Bacia Norte Uruguaia. Tesis de Maestría. Rio Claro (SP), UNESP.

Goso, H. y H. De Santa Ana. 1986. Estratigrafía de la Cuenca Norte del Uruguay. ANCAP.

HIDROSUD, 1988. Desarrollo turístico de la actividad termal en el litoral del Uruguay. Trabajo de Consultoría, Montevideo - Uruguay.

Hommer, L. 1982. Características estructurales de la Cuenca Norte del Uruguay. Informe ANCAP.

Mackinnon, J. y H. De Santa Ana. 1982. Contribución al conocimiento del Paleozoico Superior de la Cuenca Paraná del Uruguay. Publicación ANCAP. Montevideo.

Montaño, J. y M. Pessi. 1985. Estudio Hidrogeológico de Rivera. O.S.E. Montevideo - Uruguay.

Montaño, J. y R. Carrion. 1990. Optimización de la Explotación del Sistema Acuífero Jurásico-Triásico, Tacuarembó - Buena Vista. Actas del 6to. Congreso de Aguas Subterráneas. Vol. 1, 180-189. Porto Alegre, Brasil.

PETROBRAS. 1984. Informe sobre la Cuenca del Paraná. ANCAP.

Preciozzi, F.; Spoturno, J.; Heinzen, W. y Rossi, P. 1985. Carta geológica del Uruguay. Escala 1:500.000. DINAMIGE, Montevideo. Uruguay 90 pág.

Sprechmann, P., et al. 1981. Cuencas del Jurásico y Cretácico del Uruguay. Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico. Vol. 1. pág. 239-270. Buenos Aires. Argentina.

TAHAL. 1986. Proyecto agrícola de Riego basado en la perforación de pozos profundos. Tahal Consulting Engineers- VERNO, ROU, 8 tomos.

Veroslavsky, G. 1995. Análise Faciológica e Estratigráfica do Devoniano da Borda Sul da Bacia do Paraná, Uruguay. Tesis de Maestría. Rio Claro (SP), UNESP.

Walther, K. 1919. Líneas fundamentales de la estructura geológica de la República Oriental del Uruguay. Revista del Instituto de Agronomía. 2da. Serie.

Walther, K. 1932. Restos de un pez ganoide de gran tamaño provincia del gondwana uruguayo. I.G.U. Boletín 19. pág. 65 a 72. Montevideo. Uruguay.

Indice de autores

Jorge Montaño Xavier. Licenciado en Geología. Profesor Titular de Hidrogeología y Director del INGEPA (Instituto de Geología y Paleontología) de la Facultad de Ciencias de la Universidad de la República del Uruguay. Autor y coautor de numerosas publicaciones, capítulos de libros. Profesor de cursos de posgrado. Director de proyectos y programas de investigación.

Ofelia Clara Tujchneider. Licenciada en Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional del Sur. Miembro de la Carrera del Investigador Científico del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Profesora Adjunta por concurso de Hidrología Subterránea I, II e Hidrogeología Aplicada de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL). Autora y coautora de numerosos trabajos científicos en revistas y capítulos de libros, docente de cursos de posgrado, especialización y maestría. Directora de pasantes, becarios, maestrandos y proyectos de investigación.

Miguel Auge. Geólogo egresado de la Universidad Nacional de La Plata. Doctor en Ciencias Geológicas en la Universidad de Buenos Aires. Profesor Titular de Hidrogeología de la Universidad de Buenos Aires y Miembro de la Carrera del Investigador Científico del Instituto Nacional de In-

vestigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Director de proyectos de investigación de 23 becarios y tesistas. Jurado de concursos docentes, tesis de licenciatura y doctorales. Miembro de la comisión asesora del CONICET; asesor de organismos oficiales y privados. Publicó 68 trabajos en revistas, congresos y seminarios, nacionales e internacionales con referato.

Mario Felipe Fili. Licenciado en Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional del Sur. Profesor Titular por concurso de la cátedra de Geología, Geomorfología y Suelos de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL). Autor y coautor de numerosos trabajos científicos en revistas y capítulos de libros, docente de cursos de posgrado y especialización. Jurado de concursos, evaluador de proyectos y trabajos de investigación. Director de pasantes, becarios, programas y proyectos de investigación.

Marta del Carmen Paris. Ingeniera en Recursos Hídricos egresada de la Universidad Nacional del Litoral. Áreas de especialización: Hidrología Subterránea, Análisis Estadístico, Geoestadística. Docente-investigador de la Facultad de de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Codirector del proyecto de investigación "Protección de Acuíferos en la llanura santafesina" (Ciudad de Esperanza). Miembro del Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (FICH-UNL). Profesora invitada de la Universidad Nacional de Río Cuarto (Córdoba), corresponsable del dictado de la asignatura Geoestadística.

Mónica Patricia D'Elía. Ingeniera en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional del Litoral. Especialización en aguas subterráneas, isótopos ambientales, metodología para la determinación de vulnerabilidad y riesgo de contaminación. Docente-investigador de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL). Miembro del Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (FICH-UNL). Miembro investigador del proyecto "Protección de Acuíferos en la llanura santafesina" (Ciudad de Esperanza).

Marcela Alejandra Pérez. Ingeniera en Recursos Hídricos graduada en la Universidad Nacional del Litoral. Especialista en Modelación Matemática Hidrogeológica y matodologías para la determinación de parámetros hidráulicos formacionales. Docente-investigador de la Facultad

de Ingeniería y Ciencias Hídricas (UNL). Codirectora del proyecto de investigación "Geohidrología de los sistemas acuíferos en la ciudad de Paraná". Miembro del Grupo de Investigaciones Geohidrológicas (FICH-UNL).

María Inés Nagy. Licenciada en Ciencias Geológicas en la Universidad Nacional de Buenos Aires. Docente-investigadora de la UBA. Especializada en prospección geofísica con fines hidrogeológicos. Miembro del proyecto de investigación: "Gestión Sustentable de Recursos Hídricos en áreas urbanas, con énfasis en el origen del ion nitrato y aplicación de técnicas isotópicas".

María Paula Collazo. Licenciada en Geología. Docente de la cátedra de Hidrogeología. Docente-Investigadora del Proyecto PRENADER. Facultad de Ciencias. Universidad de la República del Uruguay.

Pablo Decoud. Ingeniero. Director de Captaciones Subterráneas en Obras Sanitarias del Estado. Colaborador técnico de la Cátedra de Hidrogeología de la Facultad de Ciencias. Universidad de la República del Uruguay.

Indice

Capítulo uruguayo

Colección Ciencia y Técnica

Matemática Elemental
Susana Marcipar Katz

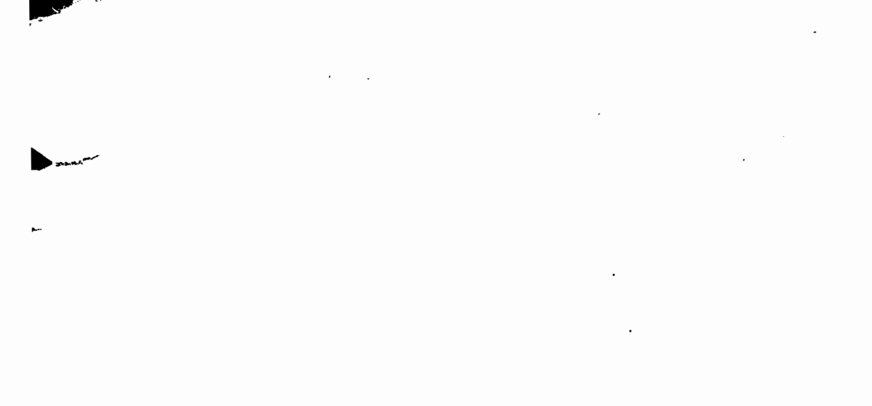
Evaluación de Proyectos de Inversión
Hugo Arrillaga (compilador)

Especulaciones sobre urbanismo y ciudad
Adrián Caballero, Mirta Soijet,
María Laura Bertuzzi, Marcelo Mántaras,
Miguel Rodriguez, Raul Tonini y otros.

El trabajador inteligente
Roberto Granados

De próxima aparición:

Producción de leche en verano
Perla Leva, Silvia Valtorta,
Horacio Castro, Miriam Gallardo, Martín Maciel,
Alberto Guglielmone y Oscar Anziani



Sistema Acuífero Guaraní se diagramó
y se compuso en el Centro de Publicaciones
de la Universidad Nacional del Litoral
y se terminó de imprimir en Imprenta Lux
Santa Fe, Argentina, octubre de 1998

Diseño de Tapa:
Guillermo Mondejar, Estudio Elephans

Ilustración de Tapa:
Fotografía de M. Percovich. Perforación en basalto, Tambores, Tacuarembó, Uruguay, 1985. Gentileza Ing. Maza.

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Hugo Storero
Rector

Hugo Marcucci
Secretario de Extensión

Luis Novara
Director Centro de Publicaciones

La presente edición sintetiza los resultados del trabajo de investigación hidrogeológica realizado por docentes-investigadores del MERCOSUR, pertenecientes a las Universidades de la República, en Uruguay, de Buenos Aires y el Litoral, en Argentina. Significa la concreción de la integración latinoamericana a través del aporte de conocimientos respecto de uno de los conflictos más importantes a los que se enfrenta la humanidad en las puertas del Tercer Milenio: la cantidad de agua dulce de la que se dispondrá para hacer frente a requerimientos cada vez mayores. Los estudios sobre el Acuífero Guaraní o Acuífero Gigante del Mercosur permiten afirmar que nos encontramos frente a una de las reservas de agua dulce compartidas más importantes del planeta. El desafío es continuar la complementación científico-tecnológica, a la vez que profundizar los lazos políticos y diplomáticos, con el fin de garantizar la implementación de herramientas de gestión sustentable de este recurso.

Universidad Nacional del Litoral Centro de Publicaciones